



TUGAS AKHIR - TE 141599

**KOORDINASI PROTEKSI GENERATOR DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN KONTROL EKSITASI GENERATOR
DAN KURVA *CAPABILITY* GENERATOR DI PT. ANTAM
SULAWESI**

Febrina Uly Nova Silalahi
NRP 2213105019

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiyantara, MT.
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599
Coordination Of Generator Protection With Generator
Excitation Control And Generator Capability On PT.
ANTAM Sulawesi

Febrina Uly Nova Silalahi
NRP 2213105019

Supervisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2015

**KOORDINASI PROTEKSI GENERATOR DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN KONTROL EKSITASI GENERATOR
DAN KURVA *CAPABILITY* GENERATOR DI PT.ANTAM
SULAWESI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Margo Pujiatara, MT.
NIP. 1966031819901001001

Dosen Pembimbing II

Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
NIP.198109052005011002



Koordinasi Proteksi Generator Dengan Mempertimbangkan Kontrol Eksitasi Generator Dan Kurva Capability Generator Di PT.Antam Sulawesi

Nama : Febrina Uly Nova Silalahi
Pembimbing 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing 2 : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT

ABSTRAK

Sistem koordinasi proteksi yang terpadu memiliki peranan yang penting untuk meningkatkan keandalan pada suatu sistem pembangkitan sehingga kontinuitas proses produksi tetap optimal. Pada tugas akhir ini akan dibahas koordinasi proteksi generator dengan mempertimbangkan eksitasi generator dan kurva *capability*. Tujuannya adalah untuk melindungi generator agar tidak terjadi kerusakan yang dapat mengakibatkan kerugian produksi yang lebih besar. Salah satu gangguan yang terjadi pada generator adalah *loss of field*. Terjadinya kehilangan eksitasi/medan mengakibatkan generator menarik daya reaktif dari beban. Jika gangguan hilang eksitasi tidak diisolir, dapat mengakibatkan generator akan berubah menjadi generator asinkron/induksi. Daya reaktif yang diambil dari sistem ini dapat melebihi rating generator sehingga menimbulkan *overload* pada belitan stator yang mengakibatkan putaran menjadi tinggi. Gangguan LOF dapat diamankan dengan mengkoordinasi rele LOF dan MEL. PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara merupakan salah satu industri yang mengharapkan sistem pembangkitannya dapat beroperasi dengan baik ketika terjadi gangguan LOF. Pada tugas akhir ini akan dianalisa koordinasi rele *loss of field* dengan MEL di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara menggunakan dua metode. Hasil analisa tersebut dipilih metode yang lebih tepat untuk diterapkan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Kata Kunci : Sistem Eksitasi, Koordinasi Proteksi Generator, Kurva Capability


Koordinasi Proteksi Generator Dengan Mempertimbangkan Kontrol Eksitasi Generator Dan Kurva *Capability* Generator Di PT.Antam Sulawesi

Nama : Febrina Uly Nova Silalahi
Pembimbing 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing 2 : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT

ABSTRAK

Sistem koordinasi proteksi yang terpadu memiliki peranan yang penting untuk meningkatkan keandalan pada suatu sistem pembangkitan sehingga kontinuitas proses produksi tetap optimal. Pada tugas akhir ini akan dibahas koordinasi proteksi generator dengan mempertimbangkan eksitasi generator dan kurva *capability*. Tujuannya adalah untuk melindungi generator agar tidak terjadi kerusakan yang dapat mengakibatkan kerugian produksi yang lebih besar. Salah satu gangguan yang terjadi pada generator adalah *loss of field*. Terjadinya kehilangan eksitasi/medan mengakibatkan generator menarik daya reaktif dari beban. Jika gangguan hilang eksitasi tidak diisolir, dapat mengakibatkan generator akan berubah menjadi generator asinkron/induksi. Daya reaktif yang diambil dari sistem ini dapat melebihi rating generator sehingga menimbulkan *overload* pada belitan stator yang mengakibatkan putaran menjadi tinggi. Gangguan LOF dapat diamankan dengan mengkoordinasi rele LOF dan MEL. PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara merupakan salah satu industri yang mengharapkan sistem pembangkitannya dapat beroperasi dengan baik ketika terjadi gangguan LOF. Pada tugas akhir ini akan dianalisa koordinasi rele *loss of field* dengan MEL di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara menggunakan dua metode. Hasil analisa tersebut dipilih metode yang lebih tepat untuk diterapkan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Kata Kunci : Sistem Eksitasi, Koordinasi Proteksi Generator, Kurva *Capability*



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

Coordination Of Generator Protection With Generator Excitation Control And Generator Capability on PT. ANTAM Sulawesi

Name : Febrina Uly Nova Silalahi
Advisor 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor 2 : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT

ABSTRACT

Integrated protection coordination system has an important role to improve the reliability of the generation system so that the continuity of the production process remains optimal. In this final project will be discussed coordination of protection taking into account the excitation generator and the generator capability curve. The aim is to protect the generator in order to avoid damage that can result in losses greater production. One of the disruption of the generator is loss of field. The loss of excitation / field resulted generator reactive power draw of the load. If the disorder is not isolated excitation is lost, it can lead to the generator will turn into a generator asynchronous / induction. Reactive power drawn from the system can exceed the generator rating, causing overload in stator windings resulting in rotation becomes high. LOF disorder can be secured by coordinating relay LOF and MEL. PT. Antam Pomalaa Southeast Sulawesi is one industry that expects pembangkitannya system can operate properly when an interruption occurs LOF. In this final project will be analyzed loss of field relay coordination with MEL PT. Southeast Sulawesi, Antam Pomalaa using two methods. Results of this analysis have been more appropriate method to be applied in PT. Antam Pomalaa Southeast Sulawesi.

Keyword: *Excitation Systems, Generator Protection Coordination,
Curve Capability*



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan kasih-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas akhir yang berjudul “ **Koordinasi Proteksi Generator Dengan Mempertimbangkan Kontrol Eksitasi Generator Dan Kurva *Capability* Generator di PT. ANTAM Sulawesi** “ diajukan guna memenuhi sebahagian persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.

Dalam tugas akhir ini dilakukan studi mengenai koordinasi proteksi generator untuk memastikan bahwa setting waktu dan daerah kerja rele dapat memberikan jaminan keamanan bagi generator pada saat kondisi asinkron karena arus eksitasi kurang dan rele tidak salah bekerja untuk kondisi abnormal di luar generator di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Pengerjaan tugas akhir ini tentu tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bpk.E.Silalahi dan Ibu L.D.M Sinaga, orangtua penulis yang selalu memanjatkan doa dan memberi semangat kepada penulis.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT., Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT., dan I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. dosen yang sabar membimbing penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
3. Teman – teman LJ 2013 gasal dan asisten LIPIST Mas Iskandar, yang telah menemani penulis berdiskusi dan menggali ilmu.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak. Penulis berharap pembaca dapat memberikan kritik dan saran bagi buku ini untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, Juni 2015

Penulis



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

JUDUL	i
PENGESAHAN	iii
ABSTRAK –ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Laporan	3
1.7 Relevansi	4
BAB II. SISTEM EKSITASI DAN PENGAMANNYA	
2.1 Sistem Eksitasi	7
2.2 Stabilitas <i>Steady State</i> Pada Generator	7
2.3 Metode Grapikal	9
2.4 Kurva <i>Capability</i>	11
2.4.1 Lingkaran <i>Stator Winding Limiter</i>	11
2.4.2 Lingkaran <i>Rotor Winding Limiter</i>	12
2.4.3 Lingkaran <i>Stator End Limiter</i>	12
2.4.4 <i>Overexcitation</i>	13
2.4.5 <i>Underexcitation</i>	13
2.4.6 <i>Steady State Stability Limited</i>	13
2.4.7 Daerah <i>Overexcitation</i>	14
2.4.8 Daerah <i>Underexcitation</i>	14
2.5 Rele <i>Loss of Field</i>	14
2.6 Konversi P-Q ke R-X	17
2.7 Koordinasi Rele <i>Loss of Field</i> Dengan <i>Minimum Excitation Limiter</i> Dan Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00...	18

BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. ANTAM POMALAA SULAWESI TENGGARA

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Antam Pomalaa	23
3.2 Jumlah Total Pembangkitan Dan Pembebanan	23
3.3 Kapasitas Pembangkitan.....	25
3.4 Sistem Distribusi PT.Antam Pomalaa	26
3.5 Beban.....	27

BAB IV. PERHITUNGAN KOORDINASI PROTEKSI GENERATOR DI PT. ANEKA TAMBANG (ANTAM) POMALAA SULAWESI TENGGARA

4.1 Pemilihan Tipikal Untuk Menentukan Nilai Impedansi Pada PT. Antam Pomalaa	31
4.1.1 Menentukan Impedansi Paling Pendek Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	31
4.1.2 Menentukan Impedansi Paling Panjang Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	32
4.1.3 Menentukan Impedansi Maksimum Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	33
4.1.4 Menentukan Impedansi Minimum Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	34
4.2 Menggambar Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00	36
4.2.1 Menggambar Lingkaran <i>Stator Winding Limiter</i>	36
4.2.2 Menggambar Lingkaran <i>Rotor Winding Limiter</i>	38
4.2.3 Menggambar Lingkaran <i>Stator End Limiter</i>	40
4.2.4 Menggambar Garis <i>Steady State Limiter</i> (SSSL)	42
4.2.5 Menggambar Garis Under Excitation Limiter / Minimum Excitation Limiter.....	43
4.3 Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00	45
4.4 Menggambar Kurva R-X.....	46
4.4.1 Menggambar Metode <i>Scheme 1</i> Pada Kurva R-X...	47
4.4.1.1 <i>Zone 1</i>	47
4.4.1.2 <i>Zone 2</i>	49
4.4.2 Kurva Koordinasi <i>Scheme 1</i> Dengan <i>Capability</i> Generator	50
4.4.3 Menggambar Metode <i>Scheme 2</i> Pada Kurva R-X...	53
4.4.3.1 <i>Zone 1</i>	53
4.4.3.2 <i>Zone 2</i>	56

4.4.4 Kurva Koordinasi <i>Scheme 2</i> Dengan <i>Capability</i> Generator	58
4.5 Koordinasi Rele LOF Dengan Rele Jarak (<i>Back up</i>)	60
4.5.1 Setting <i>Zone 1</i>	60
4.5.1.1 <i>Criteria 1</i>	61
4.5.1.2 <i>Criteria 2</i>	61
4.5.2 Setting <i>Zone 2</i>	62
4.5.2.1 <i>Criteria 1</i>	62
4.5.2.2 <i>Criteria 2</i>	66
4.5.2.3 <i>Criteria 3</i>	67
BAB V. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN 1 SLD PT ANTAM POMLAA	A-1
LAMPIRAN 2 PERHITUNGAN NILAI IMPEDANSI <i>NEW</i>	B-1
BIODATA PENULIS	C-1

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Jumlah Total Pembangkitan Dan Pembebanan	19
Tabel 3.2	Data Kapasitas Pembangkitan	21
Tabel 3.3	Generator CFPP 1G-10MKA00	21
Tabel 3.4	Data Bus	22
Tabel 3.5	Data Transformator	23
Tabel 3.6	Data Lump.....	23
Tabel 4.1	Nilai MW Dan MVAR.....	37



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kurva Stabilitas <i>Steady State</i> Generator	8
Gambar 2.2	Metode Grapikal Pada <i>Steady State Stability</i>	9
Gambar 2.3	Kurva Kapabilitas Generator	10
Gambar 2.4	Diagram Fasor Dari Arus Dan Tegangan Yang Terjadi Ketika Generator Sinkron Beroperasi	12
Gambar 2.5	Proteksi Terhadap Gangguan Hilang Penguat Generator Menggunakan Rele Mho	14
Gambar 2.6	Karakteristik Operasi Proteksi Hilang Eksitasi.....	15
Gambar 2.7	Transformasi Plot Dari MW-MVAR Ke R-X Dan R-X Ke MW-MVAR.....	16
Gambar 2.8	Setting MEL	17
Gambar 2.9	Koordinasi Dengan MEL.....	18
Gambar 3.1	<i>Single Line Diagram</i> PT. Antam Pomalaa Yang Telah Disederhanakan	20
Gambar 4.1	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Paling Pendek	25
Gambar 4.2	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Paling Panjang	26
Gambar 4.3	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Maksimum..	27
Gambar 4.4	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Minimum....	28
Gambar 4.5	<i>Stator Winding Limiter</i>	30
Gambar 4.6	Kurva <i>Stator winding limiter</i> Dan <i>Rotor Winding Limiter</i>	32
Gambar 4.7	Kurva <i>Stator Winding Limiter, Rotor Winding Limiter, Dan Stator End Limiter</i>	34
Gambar 4.8	Kurva <i>Stator Winding Limiter, Rotor Winding Limiter, Stator End Limiter, Dan SSSL</i>	36
Gambar 4.9	Kurva <i>Stator Winding Limiter, Rotor Winding Limiter, Stator End Limiter, SSSL, UEL</i>	38
Gambar 4.10	Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00	40
Gambar 4.11	Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i>	42
Gambar 4.12	Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i> Dan <i>Zone 2</i> Pada <i>Scheme 1</i>	44
Gambar 4.13	Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 1</i> Dan <i>Capability</i> Generator	45
Gambar 4.14	Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 1</i> Dan <i>Capability</i> Generator Yang	

Telah Disederhanakan	46
Gambar 4.15 Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i> <i>Scheme 2</i>	49
Gambar 4.16 Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i> Dan <i>Zone 2</i> <i>Scheme 2</i>	51
Gambar 4.17 Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 2</i> Dan <i>Capability Generator</i>	52
Gambar 4.18 Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 1</i> dan <i>Capability Generator</i> Yang Telah Disederhanakan	53
Gambar 4.19 Saluran Transmisi Dari Ganda Ke Tunggal	56
Gambar 4.20 Tipikal Untuk Menentukan $Z_{max SG1}$	57
Gambar 4.21 Tipikal Untuk Menentukan Z_{-LL1}	58

BIODATA PENULIS



Febrina Uly Nova Silalahi lahir di Pematangsiantar, 17 Februari 1992, biasa di panggil Febrina dan merupakan anak pertama dari pasangan bapak E.Silalahi dan ibu L.D.M. Sinaga. Penulis lulus dari SMA RK Budi Mulia Pematangsiantar pada tahun 2009 dan melanjutkan pendidikan Diploma 3 Politeknik Negeri Medan di tahun 2009 jurusan Teknik Elektro dan lulus pada tahun 2012. Saat ini penulis melanjutkan pendidikan di strata satu Teknik Elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Email penulis : rina.766hi@gmail.com.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem koordinasi proteksi yang terpadu memiliki peranan yang penting pada sebuah industri. Tujuannya adalah untuk melindungi generator agar tidak terjadi kerusakan yang dapat mengakibatkan kerugian produksi yang lebih besar. Pada dasarnya gangguan dapat terjadi karena kegagalan operasi peralatan dalam sistem dan kesalahan manusia. Sistem proteksi generator dan nilai settingnya, ditetapkan dengan memperhatikan batasan kemampuan operasi generator serta batasan operasi sistem.

Dilihat dari daerah kerja dan kecepatan operasinya, proteksi generator dibedakan dalam dua kelompok. Pertama, proteksi yang daerah kerjanya terbatas hanya mencakup peralatan tertentu dan tidak responsif terhadap yang terjadi di luar daerah kerjanya serta bekerja seketika. Proteksi dengan sifat ini biasa disebut sebagai proteksi unit (*unit protection*). Kelompok kedua adalah proteksi yang mempunyai daerah kerja lebih luas dan dapat bekerja (responsif) oleh pengaruh kondisi abnormal yang berasal dari luar generator. Proteksi kelompok ini bekerja lebih lambat (tidak seketika).

PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara memiliki sistem proteksi generator yang sudah tua dan sering terjadi gangguan. Salah satu jenis gangguan yang timbul pada generator adalah kehilangan eksitasi / *loss of excitation* pada rotor. Terjadinya kehilangan eksitasi/medan mengakibatkan generator menarik daya reaktif dari beban. Jika gangguan hilang eksitasi tidak diisolir, dapat mengakibatkan sudut phasa arus mendahului terhadap tegangan sehingga generator akan berubah menjadi generator asinkron/induksi. Daya reaktif yang diambil dari sistem ini dapat melebihi rating generator sehingga menimbulkan kerusakan mekanis yaitu kerusakan turbin diikuti kerusakan generator yang berakibat fatal. Akibat lain yang ditimbulkan adalah daya reaktif yang diambil dari sistem ini akan dapat melebihi rating generator sehingga menimbulkan *overload* pada belitan stator dan *overheat* yang mengakibatkan penurunan tegangan generator.

Oleh karena itu, untuk menghindari terjadinya kehilangan kuat medan/eksitasi maka perlu direncanakan penggantian peralatan proteksi generator dengan menggunakan rele *loss of field*. Tujuannya untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi sehingga kontinuitas proses

produksi tetap optimal. Penggantian peralatan proteksi ini juga bertujuan untuk memperbarui teknologi rele yang digunakan. Rele elektromekanik yang ada saat ini perlu diganti dengan rele numerik yang memiliki lebih presisi dan setting rele akan lebih fleksibel. Sehubungan dengan hal tersebut, maka tugas akhir ini difokuskan pada studi koordinasi proteksi generator untuk mengetahui setting rele yang tepat pada sistem proteksi *loss of field* di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

1.2 Perumusan Masalah

Setiap industri khususnya PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara selalu mengharapkan sistem pembangkitannya dapat beroperasi dengan baik, sehingga industri tersebut dapat melaksanakan proses produksi dengan lancar. Akan tetapi jika sistem pembangkitannya mengalami gangguan, secara khusus gangguan *loss of field* maka dapat mengakibatkan generator *off* dan proses produksi akan terganggu. Oleh karena itu, perlu untuk di analisa bagaimana setelan dan koordinasi rele *loss of field* (LOF) dengan *minimum excitation limiter* (MEL) yang tepat pada sistem kelistrikan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah koordinasi rele LOF dengan *minimum excitation limiter* (MEL) di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara. Analisa perhitungan koordinasi ini menggunakan dua metode yaitu *scheme 1* dan *scheme 2*. Kemudian hasil perhitungannya diplot ke Ms.Excel.

1.4 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan memilih metode yang tepat digunakan untuk mengamankan gangguan *loss of field* pada generator di PT. ANTAM Pomalaa, agar ketika terjadi gangguan tersebut generator secara langsung tidak *off*. Sehingga keamanan peralatan dan keperluan operasi sistem juga dapat dipenuhi secara optimal.

1.5 Metodologi

Sebelum menganalisa koordinasi rele LOF dan MEL, hal yang dilakukan pertama kali yaitu mempelajari buku serta referensi yang berhubungan dengan sistem eksitasi generator, rele loss of field dan koordinasi rele LOF dan MEL. Hal ini dilakukan untuk menambah pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi dan mengetahui langkah-langkah dalam menyelesaikan permasalahan tersebut.

Pengumpulan data - data mengenai sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara meliputi *single line diagram* dan data peralatan seperti rating generator, motor, bus, trafo dan lainnya.

Kemudian melakukan analisa yakni perhitungan manual impedansi berdasarkan tipikal yang digunakan pada sistem kelistrikan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara meliputi penghitungan impedansi line transmisi yang terpanjang dan terpendek, impedansi seluruh sistem, impedansi dengan sumber paling lemah, mencari jari – jari dan titik pusat lingkaran untuk menggambar kurva *capability* generator dan koordinasi rele LOF dan MEL. Perhitungan untuk menggambar kurva koordinasinya berdasarkan dua metode yaitu *scheme 1* dan *scheme 2*.

Pengeplotan kurva *capability* generator dan koordinasi rele LOF dengan MEL dilakukan dengan menggunakan Ms.Excel. Kurva koordinasi tersebut kemudian dianalisa dan dipilih yang paling efisien digunakan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Laporan tugas akhir berisi hasil analisis koordinasi rele LOF dengan MEL. Dengan nilai setting yang telah didapatkan, diharapkan sistem proteksi dapat bekerja dengan cepat dan selektif ketika terjadi gangguan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terdiri dari lima bagian dan masing – masing bab akan dijelaskan sebagai berikut.

Bab 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang pembuatan tugas akhir, permasalahan yang akan diangkat, tujuan, metodologi penulisan dan sistematika penulisan tugas akhir.

Pada bab 2 berisi tentang sistem eksitasi dan pengamannya. Bab ini berisi teori - teori penunjang yang menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Bab 3 membahas tentang sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara meliputi bagaimana konfigurasinya serta beberapa hal mengenai operasi sistem tenaga listrik di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Bab 4 merupakan penghitungan koordinasi proteksi generator di PT. Aneka Tambang (ANTAM) Pomalaa Sulawesi Tenggara. Dalam bab ini menyajikan analisis terhadap koordinasi proteksi yang baru ketika terjadi gangguan LOF sehingga menghasilkan koordinasi proteksi LOF yang tepat. Kemudian mengplot hasil perhitungan manual ke ms.excel untuk memperoleh grafik kurva *capability* generator, dan koordinasi rele LOF dengan MEL pada kurva R-X. Bab 5 adalah penutup yang berisi kesimpulan, saran dan rekomendasi dari hasil analisis yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat seperti, dapat memperbaiki koordinasi rele LOF dan MEL di Aneka Tambang (ANTAM) Pomalaa Sulawesi Tenggara sehingga sistem proteksinya lebih selektif. Selain itu, tugas akhir ini dapat menjadi referensi mahasiswa lain yang hendak mengambil tugas akhir serupa.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 2

SISTEM EKSITASI DAN PENGAMANNYA

2.1 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi bertujuan untuk mempertahankan generator agar tetap sinkron. Selain itu, sistem eksitasi juga mempengaruhi jumlah daya reaktif yang dibangkitkan dan diserap generator. Semakin bertambah arus eksitasi maka daya reaktif juga akan bertambah. Pada sistem eksitasi juga ada hubungan antara tegangan terminal VT dan daya reaktif Q. Ketika muatan lambat ditambahkan pada generator sinkron, tegangan terminalnya akan menurun. Sebaliknya, ketika muatan utama ditambahkan pada generator sinkron, maka tegangan terminalnya akan naik.

Secara umum alat yang digunakan untuk mengontrol tegangan pada generator adalah AVR (*automatic voltage regulator*). Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (eksitasi) pada *exciter*. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan (eksitasi) pada *exciter*. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (eksitasi) pada *exciter*. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis. AVR mengatur arus eksitasi yang besar pada *over excitation limiter* (OEL). OEL merupakan batas arus eksitasi sebelum generator beroperasi *overload*. AVR juga mengatur arus eksitasi pada *under excitation limiter* (UEL) misalnya saat kehilangan eksitasi pada generator sinkron.

2.2 Stabilitas *Steady State* Pada Generator

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil. Pada kondisi stabil maka osilasi akan tetap terjadi sampai akhirnya berada pada posisi tertentu untuk kondisi yang baru.

Sistem eksitasi generator akan peka terhadap perubahan tegangan yang menyebabkan osilasi sudut rotor dan memperkuat atau memperlemah medan generator, sehingga mempengaruhi kecepatan

mesin untuk mencapai kondisi operasi yang stabil. Kondisi seperti itu akan selalu ada pada sistem tenaga listrik karena beban yang ada akan selalu bertambah, dan semua generator yang terinterkoneksi harus selalu menyesuaikan energi input, sudut rotor, dan eksitasi agar sesuai dengan kondisi pada saat itu juga.

Ketika daya yang dibawa ke beban pada saluran transmisinya sangat kecil, maka akan menimbulkan rugi-rugi yang mengakibatkan ketidakstabilan. Gambar 2.1 mengilustrasikan bagaimana ketidakstabilan *steady state* terjadi pada sebuah sistem sederhana tanpa adanya rugi-rugi. Daya aktif yang dikirim dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$P_e = \frac{E_g \times E_s}{X} \sin(\theta_g - \theta_s) \quad 2.1$$

dimana :

P_e = Daya aktif yang dikirim

E_g = Tegangan generator

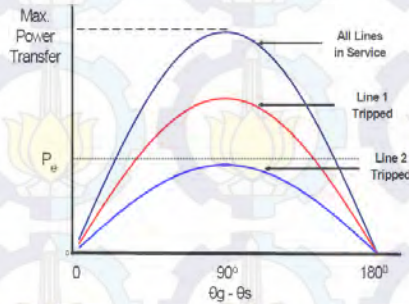
E_s = Tegangan sistem

X = Reaktansi *steady state* antara generator dan sistem

θ_g = sudut tegangan generator

θ_s = sudut tegangan sistem

$$P_{max} = \frac{E_g \times E_s}{X} \quad 2.2$$



Gambar 2.1 Kurva stabilitas *steady state* generator[1]

Dari persamaan 2.2 dapat dilihat bahwa daya maksimum yang dapat ditransmisikan ketika sudut $\theta_g - \theta_s = 90^\circ$ listrik, dimana $\sin 90^\circ = 1$. Ketika sudut tegangan generator dan tegangan sistem melebihi 90° , maka daya maksimum yang ditransfer menjadi turun dan tidak cukup untuk mempertahankan sinkronisasi. Ketika line 2 trip kurva sudut $\theta_g - \theta_s$ akan turun, maka daya yang ditransfer tidak dapat dijaga dan sistem menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan *steady state* dapat terjadi bersamaan dengan tripnya *line* transmisi yang dapat meningkatkan reaktansi antara beban dengan pembangkit yang jauh. Metode grafik dapat digunakan untuk menentukan batas stabilitas *steady state* pada sebuah generator.

2.3 Metode Grapikal

Daerah kestabilan *steady state* menggambarkan kemampuan generator menyesuaikan perubahan beban. *Steady state stability limiter* (SSSL) merupakan penentuan batas maksimum dari pembangkitan generator agar pembangkit tersebut masih tetap sinkron. Jika batas SSSL ini tercapai maka pembangkit akan lepas sinkron.

Metode grafik merupakan suatu metode untuk menggambarkan SSSL. Metode ini ditunjukkan pada gambar 2.2. Persamaan untuk mencari jari-jari lingkaran SSSL adalah :

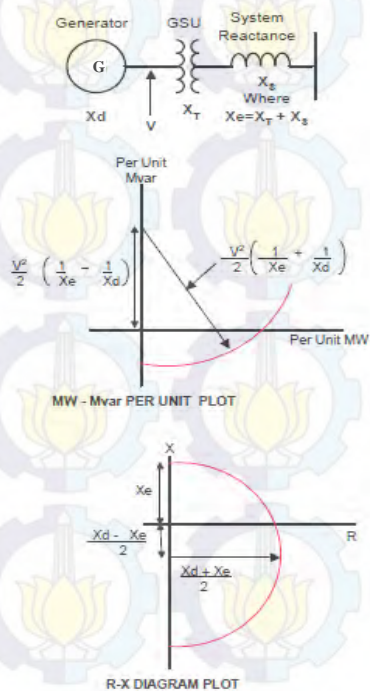
$$\text{Jari - jari lingkaran SSSL} = \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \quad 2.3$$

dimana :

V^2 = Tegangan terminal generator (V)

X_e = Reaktansi hasil penjumlahan dari reaktansi sistem dan reaktansi trafo step up (ohm)

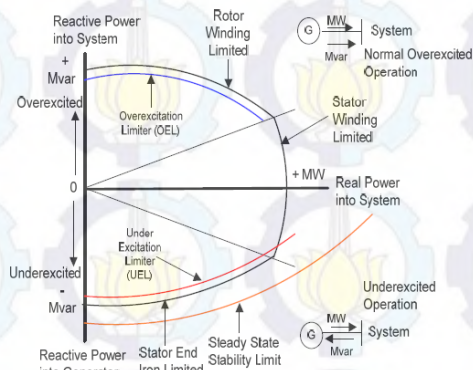
X_d = Reaktansi sinkron generator (ohm)



Gambar 2.2 Metode Grapikal pada *Steady State Stability*[1]

2.4 Kurva Kapabilitas Generator

Kurva *capability* adalah sebuah kurva yang merepresentasikan limitasi kinerja sebuah generator sinkron, baik itu limitasi internal (efek pemanasan pada lilitan stator dan rotor) maupun limitasi external (*prime-mover*/penggerak mula, atau yang lain). Secara teknis, kurva ini merupakan plot *complex power* ($S=P+jQ$) pada tegangan terminal generator yang konstan. Dengan demikian, untuk operasi yang optimal, generator harus bekerja di dalam area kurva tersebut. Kinerja di luar kurva biasanya masih diizinkan, namun untuk durasi yang sangat singkat. Kurva *capability* direpresentasikan di dalam bidang *cartesian* (x-y) dan dapat diperhatikan pada gambar 2.3. Namun sumbu-sumbunya tidak menggunakan sumbu x-y, melainkan P-Q (*real dan reactive power*).



Gambar 2.3 Kurva Kapabilitas Generator[1]

Kurva *capability* generator terbentuk dari tiga lingkaran yang saling berpotongan pada satu titik. Ketiga lingkaran tersebut adalah :

2.4.1 Lingkaran stator winding limiter

Arus jangkar / *armature* (I_a) yang mengalir pada belitan stator mengakibatkan rugi daya ($I^2 \times R$). Rugi daya ini dapat mengakibatkan peningkatan suhu konduktor dan lingkungan terdekat. Jika dibiarkan, peningkatan suhu ini dapat terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, salah satu batasan dalam kurva *capability* generator yaitu besar arus

maksimum yang dapat dibawa oleh jangkar tanpa melebihi batas pemanasan yang diizinkan.

2.4.2 Lingkaran rotor winding limiter

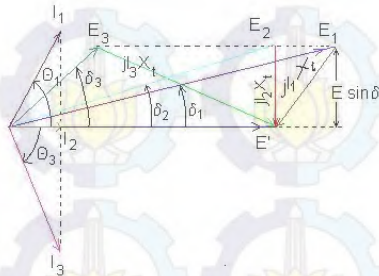
Rotor winding limiter disebut juga *field current limiter*/batas arus medan. Akibat adanya pemanasan yang dihasilkan dari rugirugi tembaga pada belitan rotor, maka arus rotor juga menentukan batas dalam operasi generator. Batas arus rotor dipengaruhi oleh arus eksitasi. Dimana arus eksitasi dapat dipertahankan konstan dengan mempertahankan arus searah I_f dibelitan medan konstan.

2.4.3 Lingkaran stator end limiter

Pemanasan ujung inti stator menentukan batas operasi generator dalam daerah eksitasi lemah (daerah dibawah sumbu P). Pemanasan ujung inti stator disebabkan oleh fluks bocor di celah udara. Fluks bocor tersebut merupakan hasil penjumlahan vektor fluks arus beban di belitan stator dan fluks arus searah pada belitan rotor. Sebagian besar fluks bocor melewati celah udara antara belitan stator dan rotor dan sebagian kecil fluks bocor tetap berada pada bagian akhir dari belitan stator.

Pada saat generator beroperasi dalam kondisi eksitasi lebih maka arus medan tinggi, sehingga di cincin penahan (*retaining ring*) akan mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang kecil. Pada saat beroperasi dalam kondisi eksitasi lemah maka arus medan kecil, sehingga di cincin penahan tidak mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang tinggi.

Selain itu pada kurva *capability* generator juga terdapat batas ketika *over* eksitasi, *under* eksitasi dan *steady state stability limit*.



Gambar 2.4 Diagram fasor dari arus dan tegangan yang terjadi ketika generator sinkron beroperasi. [2]

2.4.4 Keadaan eksitasi berlebih (*over excitation*)

Pada Gambar 2.4, ketika tegangan eksitasi sebesar E_1 , maka arus medan eksitasi menghasilkan terlalu banyak fluks /*over-excitation*. Fasor arus mengasumsikan posisi I_1 yang sedemikian sehingga ketika fasor $j I_1 X_t$ ditambahkan kepada fasor E_1 akan memberikan tegangan terminal E' . Hal ini menjadikan arus reaktif yang 'mendahului E_1 '/leading dialirkan dan berlaku untuk mengurangi kemagnetan (demagnetisasi) medan fluks untuk menambah kebutuhan tegangan terminal.

2.4.5 Keadaan eksitasi rendah (*under excitation*)

Ketika tegangan eksitasi adalah E_3 maka motor berada pada keadaan eksitasi-rendah (*under-excitation*). Arus keluaran pada keadaan ini diasumsikan pada posisi I_3 dan faktor daya adalah '*lagging*' atau 'arus tertinggal dari tegangan'. Keadaan arus I_3 yang tertinggal ini mempunyai efek magnetisasi yang membantu membentuk fluks celah-udara seperti yang dibutuhkan oleh tegangan terminal E' .

2.4.6 *Steady state stability limit*

Saat beroperasi dalam kondisi beban penuh, generator cenderung bekerja pada daerah *leading*, yaitu daerah yang menyerap daya reaktif dari sistem. Dalam kondisi ini, generator harus dioperasikan secara hati-hati, sehingga ditambahkan batas kestabilan *steady state* dalam daerah operasi generator. Kondisi operasi keadaan tunak tercapai jika daya output mekanik (P_m) seimbang dengan daya keluaran listrik (P_e).

Apabila beban pada generator meningkat maka putaran rotor akan melambat, dan sebaliknya akan semakin cepat apabila beban menurun.

Generator mampu menyerap atau memberikan daya reaktif, namun kemampuan ini dibatasi oleh kurva kapabilitas yang dimiliki oleh setiap generator (biasanya kurva ini sebagai acuan pada saat pengoperasian). Pada kurva *capability* terdapat 2 daerah yang masing-masing mempunyai pengertian yaitu :

2.4.7 Daerah Over Excitation

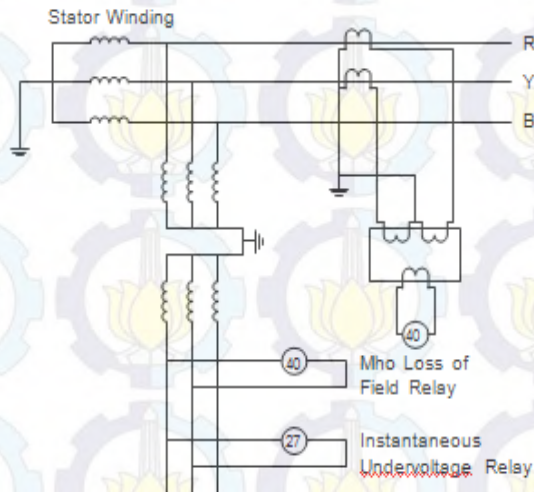
Jika generator memberikan / mensuplai daya reaktif, maka hal ini akan mengakibatkan panas yang berlebihan pada lilitan rotornya. *Over excitation* limit juga mencegah terjadinya *overheating* dari kumparan medan, dan mengurangi (arus medan) I_f .

2.4.8 Daerah Under Excitation

Jika generator menyerap daya reaktif, maka hal ini akan mengakibatkan panas yang berlebihan pada lilitan statornya. *Under excitation* limit mencegah *overheating* pada inti rotor, meningkatkan eksitasi ketika *var leading* diatas *setting* dari P-Q kurva, dan meningkatkan tegangan terminal (V_t).

2.5 Rele Loss of Field (40)

Penguatan medan akan hilang pada suatu generator sinkron, jika terjadi gangguan misalnya terbakarnya saklar medan, *open circuit* dalam rangkaian medan atau gangguan pada AVR (*Automatic Voltage Regulator*). Ketika generator kehilangan arus penguatan, generator akan bekerja sebagai generator induksi. Generator juga akan berputar diatas kecepatan normal dan selanjutnya juga akan mengurangi daya semu (VA) dan menyerap daya reaktif dari sistem. Bila sistem dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif yang diperlukan, maka tegangan tidak akan terganggu, tetapi apabila tidak maka tegangan akan turun dan kestabilan generator yang terhubung paralel akan terganggu. Bila generator tetap beroperasi pada keadaan seperti ini, maka akan menimbulkan arus tidak normal pada rotor dan menghasilkan torsi yang tinggi pada rotor.



Gambar 2.5 Proteksi Terhadap Gangguan Hilang Penguat Generator Menggunakan Rele Mho[3]

Untuk mengamankan gangguan hilangnya penguatan medan maka pada generator berdasarkan standar ANSI dipakai rele *loss of excitation* (LOF) tipe CEH51A. Rele ini bekerja berdasarkan besarnya daya reaktif yang diserap sistem, diukur dari besarnya impedansi kapasitif yang ditimbulkan. Rele ini juga bekerja berdasarkan sudut antara arus dan tegangan dari daya reaktif tersebut. Semakin besar daya reaktif yang diserap, maka akan semakin besar pula impedansi yang timbul. Besarnya impedansi dinyatakan dengan besarnya jari-jari lingkaran. Untuk perhitungan *setting* rele ini cukup menggunakan konstanta mesin (reaktansi *transient* dan *subtransient*) serta tegangan sistem.

Proteksi hilang eksitasi menggunakan dua buah *mho relay* dengan karakteristik operasi berikut ini :

1. Karakteristik 1 disebut juga dengan zone 1, digunakan sebagai proteksi hilang eksitasi dengan setting kondisi beban lebih tinggi dari 30%. Digunakan *mho relay* dengan setting berikut :

$$\text{Offset} = -\frac{X_d'}{2} \quad 2.4$$

$$\text{Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 2.5$$

2. Karakteristik 2 disebut juga dengan zone 2, digunakan sebagai proteksi hilang eksitasi dengan setting pada seluruh kondisi beban. Digunakan *mho relay* dengan setting berikut :

$$\text{Diameter} = X_d \quad 2.6$$

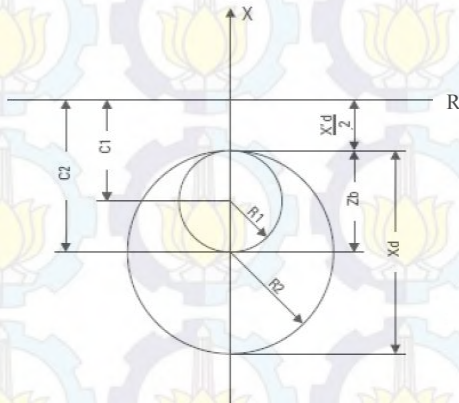
$$\text{Offset} = -\frac{X_d'}{2} \quad 2.7$$

$$\text{Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 2.8$$

dimana :

X_d = Reaktansi sinkron generator

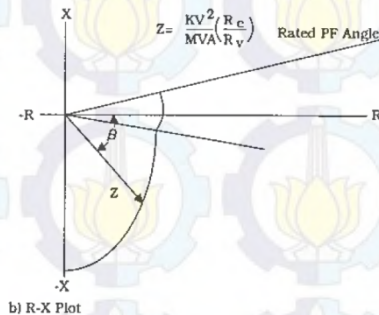
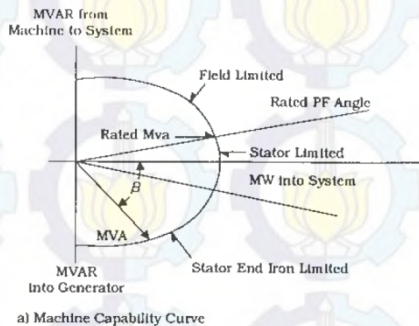
X_d' = Reaktansi transien generator



Gambar 2.6 Karateristik operasi proteksi hilang eksitasi[3]

2.6 Konversi P-Q ke R-X

Karakteristik proteksi loss of field (40) umumnya diperlihatkan pada diagram R-X menggunakan metode *mho relay*. Umumnya metode ini menggunakan perbandingan dua input (dapat berupa besaran atau sudut fasa) untuk menentukan apakah gangguan yang terjadi berada di dalam atau di luar daerah kerja rele. Koordinasi *capability* generator dengan rele *loss of field* yaitu dengan mengubah kurva generator *capability* MW-MVAR (P-Q) ke kurva R-X.



Gambar 2.7 Transformasi plot dari MW-MVAR ke R-X dan R-X ke MW-MVAR[4]

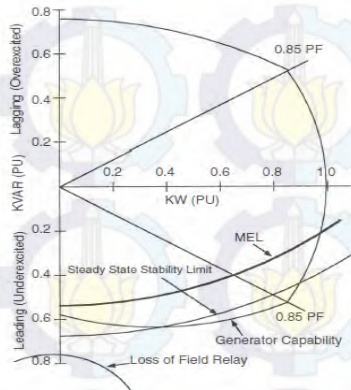
$$Z_{relay} = \frac{(KV)^2 \times R_c}{MVA \times R_v} \quad 2.9$$

$$MVA = \frac{(KV)^2}{Z_{relay}} \times \frac{R_c}{R_v} \quad 3.1$$

dimana Z_{relay} adalah impedansi rele (ohm), KV adalah tegangan sistem, MVA adalah apasitas generator (MVA), R_c adalah rasio arus, R_v adalah rasio tegangan .

2.7 Koordinasi *rele loss of field* dengan *minimum excitation limiter* (MEL) dan kurva *capability* Generator 1G-10MKA00

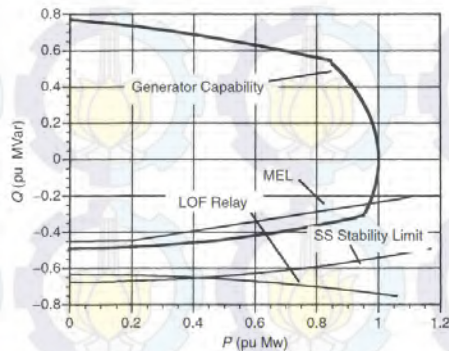
MEL adalah batas minimum eksistasi dari generator (mode leading),yang diintegrasikan dgn AVR. Ketika terjadi perubahan tegangan mengakibatkan aliran Var makin membesar ke generator maka ketika batasan MEL tercapai, AVR akan bekerja untuk menambah arus eksistasi agar tegangan generator naik sehingga Var yang mengalir ke generator berkurang. Sehingga titik kerja operasi generator tetap terjaga dalam batas kurva kapabilitas generator tersebut. Jadi MEL sebagai set point dari AVR. Jika tercapai maka AVR akan berespon.



Gambar 2.8 Setting MEL[5]

Koordinasi antara MEL dan LOF tercapai ketika karakteristik LOF tidak *overlap* terhadap MEL. Ketika terjadi swing pada sistem yang menyebabkan generator berada pada mode leading var, maka

diharapkan MEL bekerja dulu sebelum LOF relay bekerja. Swing atau ayunan pd rotor, terjadi ketika ada gangguan. Gangguan tersebut bisa berupa hubung singkat, dan pelepasan beban. Gangguan ini menyebabkan perubahan tegangan pada generator. LOF relay bekerja untuk memproteksi generator akibat hilangnya medan eksitasi yang menyebabkan tegangan generator akan turun drastis.



Gambar 2.9 Koordinasi dengan MEL[5]

Swing ada yang tidak membuat sistem lepas sinkron tapi ada juga yang menyebabkan generator bisa lepas sinkron, tergantung besar gangguan dan letak gangguan. Swing yang tidak menyebabkan lepas sinkron maka diharapkan MEL yg bekerja (AVR bekerja), tetapi jika swing itu mencapai batas *Steady state stability limit* (SSSL) maka LOF diharapkan kerja. Jadi rele LOF bekerja pada saat ada gangguan internal generator (bagian eksitasi) yg menyebabkan *loss off* eksitasi dan pada saat SSSL tercapai. Pada saat generator beroperasi mode leading maka tegangan generator akan berkurang, terlebih lagi ketika generator mengalami *loss of field*. Ketika tegangan generator berkurang, maka batas SSSL generator juga akan berkurang, yang berarti generator akan mendekati batas lepas sinkronnya.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. ANTAM POMALAA SULAWESI TENGGARA

PT. Aneka Tambang / Antam (Persero) merupakan perusahaan pertambangan yang komoditas utamanya adalah bijih nikel kadar tinggi atau saprolit, bijih nikel kadar rendah atau limonit, feronikel, emas, perak dan bauksit. Dalam menjalankan bisnisnya, PT. Antam memiliki 9 unit di Indonesia dan 1 unit di Australia. Salah satu unit di Indonesia adalah PT. Antam Pomalaa di Sulawesi Tenggara.

3.1. Sistem Kelistrikan PT. Antam Pomalaa

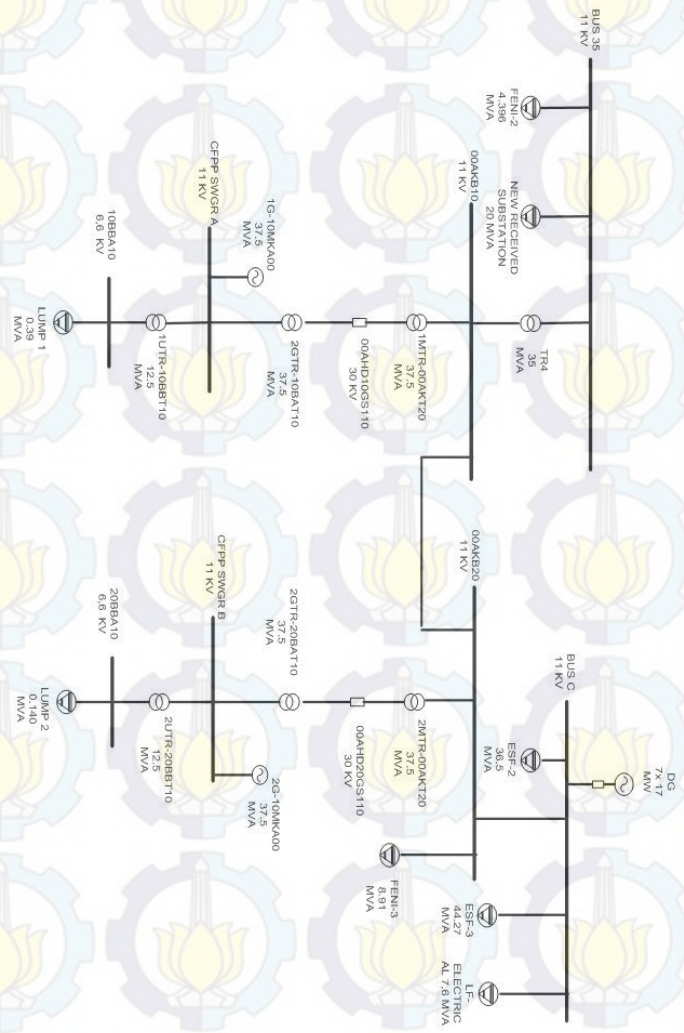
PT. Antam Pomalaa melayani kebutuhan suplai daya ke beban-bebannya dengan mengoperasikan 2 unit STG (*Steam Turbin Generator*) dengan kapasitas masing -masing 31,875 MW. Sistem distribusi yang digunakan adalah sistem *ring* dengan tegangan distribusi 30 kV dan 11-6,6 kV untuk tegangan menengah, dan tegangan 0,4 kV untuk tegangan rendahnya menggunakan sistem distribusi radial. *Single line diagram* sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa yang telah disederhanakan dapat dilihat pada Gambar 3.1. *Single line diagram* PT. Antam Pomalaa yang lengkap dapat dilihat di lampiran.

3.2. Jumlah Total Pembangkitan Dan Pembebanan

Jumlah total pembangkitan dan pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Jumlah Total Pembangkitan dan Pembebanan

Uraian	MW	MVAR	MVA
Source	200,358	142,32	245,76
Total Motor Load	41,4924	15,9194	44,44
Total Static Load	80,3677	17,2883	82,21



Gambar 3.1Single line diagram PT. Antam Pomalaa yang telah disederhanakan

3.3. Kapasitas Pembangkitan

Sistem pembangkitan utama yang terdapat pada sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa adalah tiga unit STG (*Steam Turbin Generator*) dan delapan unit DG (*Diesel Generator*). Tiga unit STG memiliki kapasitas masing – masing 31,875 MW sedangkan delapan unit DG memiliki kapasitas masing – masing 17,076 MW. Saat kondisi normal, tiga STG dan delapan DG akan beroperasi. Data kapasitas pembangkitan tertera pada tabel 3.2 dan data generator CFPP tertera pada tabel 3.3.

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkitan

No	ID	kV	MVA	MW	pf	% eff	rpm
1.	1G-10MKA00	11	37,5	31,875	0,85	95	1500
2.	2G-20MKA00	11	37,5	31,875	0,85	95	1500
3.	G11	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
4.	G12	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
5.	G13	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
6.	G14	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
7.	G15	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
8.	G16	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
9.	G17	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
10.	G18	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500

Tabel 3.3 Generator CFPP 1G-10MKA00

Generator	
Kapasitas Generator	37500 KW
Tegangan Generator	11000 KV
Cos φ	0.85
Arus output	1969 A
Reaktansi Generator	
Reaktansi Sinkron (X_d)	2,13 pu
Reaktansi transient (X'_d)	0,35 pu
Reaktansi subtransient (X''_d)	0,2 pu
Speed	1500 Rpm

3.4. Sistem Distribusi PT. ANTAM POMALAA

Sistem distribusi yang digunakan ialah sistem distribusi radial dengan dua feeder utama yang dihubungkan oleh switch. Pada sistem kelistrikan PT.Antam Pomalaa tegangan output generator langsung disalurkan ke masing – masing bus beban kemudian dari tiap – tiap bus ini tegangan akan diturunkan. Tegangan dari generator 1G-10MKA00 dan 2G-10MKA20 disalurkan ke bus 11 kV sesuai dengan tegangan generator kemudian diturunkan ke tegangan 6,6 kV. Selain itu, daya dari generator juga disalurkan ke saluran dengan tegangan 30 kV menggunakan trafo step up. Lalu, tegangan ini akan diturunkan kembali ke tegangan 11 kV dan 6,6 kV untuk menyuplai beban besar. Beban – beban ini juga di suplai daya dari generator G11 sampai generator G18.

PT. Antam Pomalaa mempunyai banyak transformator untuk menyuplai beban-beban yang digunakan. Tabel 3.4 menunjukkan data beberapa bus dan table 3.5 menunjukkan data beberapa transformator daya yang ada di PT. Antam Pomalaa .

Tabel 3.4 Data bus

No	BUS	Tegangan (KV)
1	CFPP SWGR A	11
2	CFPP SWGR B	11
3	BUS C	11
4	BUS 35	11
5	00AKB10	11
6	00AKB20	11
7	00AHD10GS110	30
8	00AHD20GS110	30
9	10BBA10	6,6
10	20BBA10	6,6

Tabel 3.5 Data Transformator

No.	ID	Daya (MVA)	Tegangan (kV)	
			Primer	Sekunder
1.	2GTR-10BAT10	37,5	11	32
2.	2GTR-20BAT10	37,5	11	32
3.	1MTR-00AKT20	37,5	29	11
4.	2MTR-00AKT20	37,5	29	11
5.	TR4	35	11	6,9
6.	1UTR-10BBT10	12,5	11	6,8
7.	2UTR-20BBT10	12,5	11	6,8

3.5. Beban

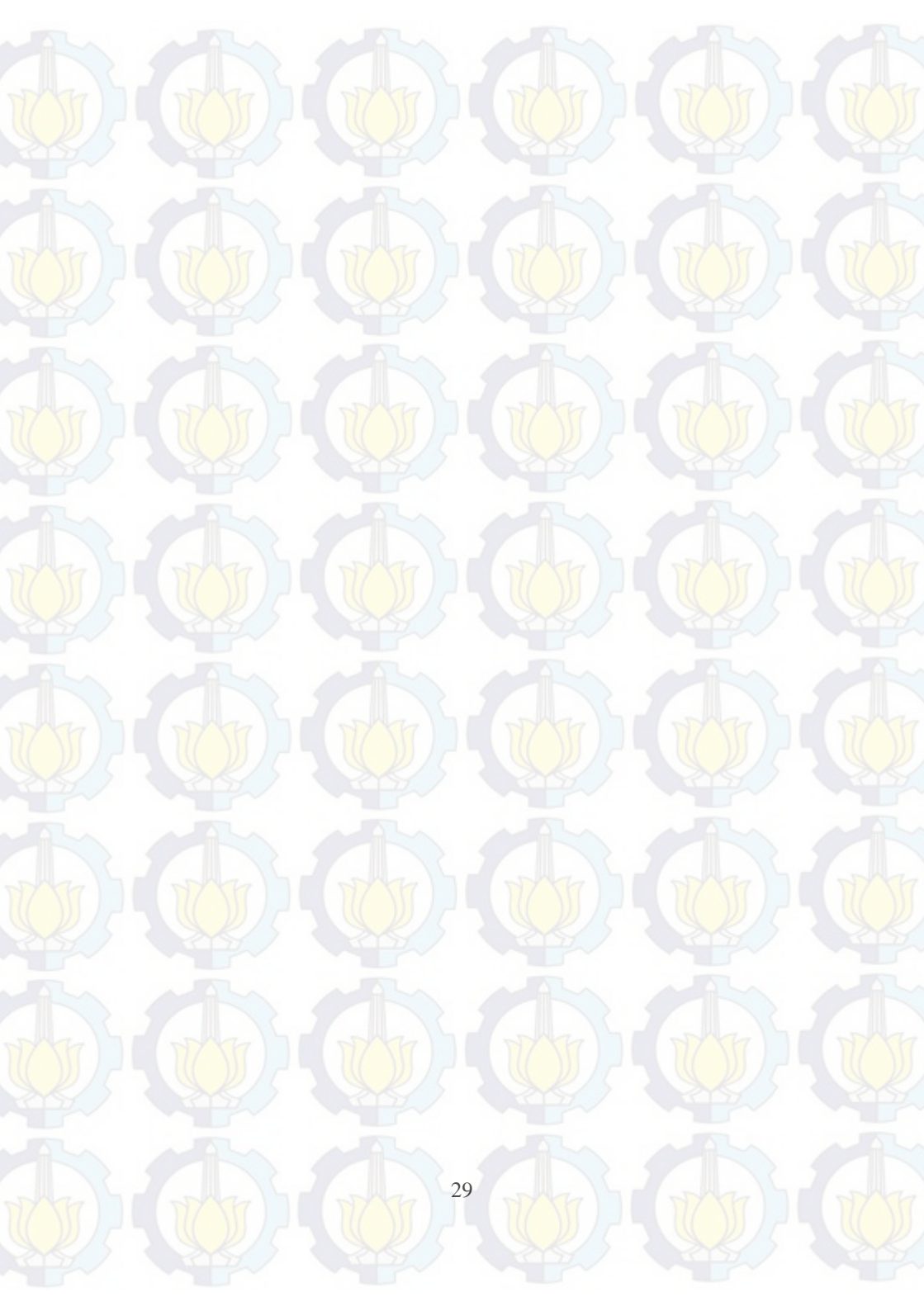
Beban – beban tenaga listrik di PT. Antam Pomalaa terdiri dari beban motor dan beban statis. Beberapa beban motor dan static di gabungkan menjadi beban lump. Pada tabel 3.6 merupakan data dari beban lump.

Tabel 3.6 Data Lump

No	ID	Rating (MW)	MVA	kV	A	% PF
1	ESF-2	36,135	36,5	33	638,6	0,99
2	ESF-3	43,827	44,27	33	774,5	0,99
3	LF- ELECTRICAL	6,08	7,6	11	398,9	0,8
4	FENI-3	8,019	8,91	6,6	779,4	0,9
5	FENI-2	3,956	4,396	6,6	384,6	0,9
6	NEW RECEIVED SUBSTATION	16,8	20	6,6	1750	0,84
7	LUMP 1	0,336	0,395	0,4	570,1	0,85
9	LUMP 2	0,119	0,140	0,4	202,1	0,85



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



BAB 4

PERHITUNGAN KOORDINASI PROTEKSI GENERATOR DI PT. ANEKA TAMBANG (ANTAM) POMALAA SULAWESI TENGGARA

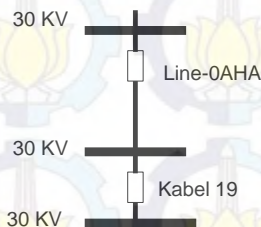
4.1 Pemilihan tipikal untuk menentukan nilai impedansi pada PT. Antam Pomalaa

Untuk mempermudah dalam melakukan setting koordinasi proteksi *loss of field* dengan *under excitation limiter* (UEL) / *minimum excitation limiter* (MEL) di PT. Antam Pomalaa, maka dibuat beberapa tipikal yang dapat mewakili sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa. Tipikal ini akan menjadi acuan dalam setting koordinasi proteksi *loss of field* dengan MEL.

Pada koordinasi pengaman kehilangan kuat medan/eksitasi PT. Antam Pomalaa dipilih beberapa tipikal yang mewakili keseluruhan sistem. Tipikal-tipikal tersebut dipilih atas dasar saluran terpanjang, saluran terpendek yang terkoordinasi dengan saluran terpanjang, line paling kuat (arus gangguan paling besar) diluar sistem dan total pemakaian sistem. Tipikal tersebut adalah :

4.1.1 Menentukan impedansi paling pendek berdasarkan *single line plant*

Nilai impedansi paling pendek merupakan impedansi terpendek pada sistem transmisi yaitu setelah trafo 2GTR-10BAT10 sampai *Line-0AHA*. Untuk menentukan nilai impedansi paling pendek maka dipilih tipikal seperti gambar 4.1.



Gambar 4.1 Tipikal untuk menghitung impedansi paling pendek

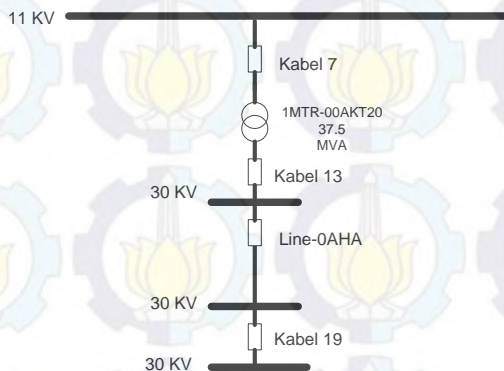
Dari tipikal di atas maka diperoleh :

$$Z_{\text{shortest transmission line}} = Z_{19} + Z_{\text{LINE-0AHA}} \\ = 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} + 1,83 \times 10^{-3} + j 7,22 \times 10^{-3}$$

$$Z_{\text{shortest transmission line}} = 1,956 \times 10^{-3} + j 9,102 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

4.1.2 Menentukan impedansi paling panjang berdasarkan *single line plant*

Nilai impedansi paling panjang merupakan nilai impedansi dari kabel 19 samapai kabel 7. Untuk menentukan nilai impedansi paling panjang maka dipilih tipikal seperti gambar 4.2.



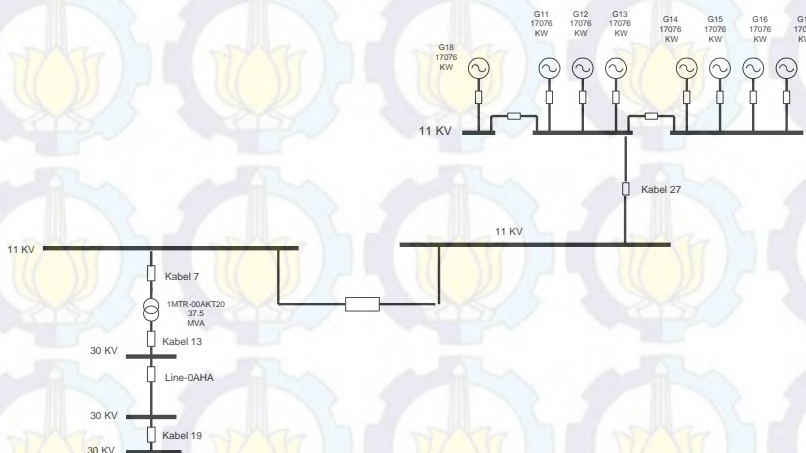
Gambar 4.2 Tipikal untuk menghitung impedansi paling panjang

Dari tipikal di atas maka diperoleh :

$$Z_{\text{longest transmission line}} : \\ = Z_{19} + Z_{\text{LINE-0AHA}} + Z_{13} + Z_{1\text{MTR-00AKT}10} + Z_7 \\ = 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} + 1,83 \times 10^{-3} + j 7,22 \times 10^{-3} \\ + 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} + 1,0425 \times 10^{-3} + j 0,04686 + 3,304 \times 10^{-4} + j 7,604 \times 10^{-3}$$

$$Z_{\text{longest transmission line}} = 3,44 \times 10^{-3} + j 0,0654 \text{ pu}$$

Nilai impedansi maksimum merupakan total impedansi pada sistem atau total impedansi setelah dari pembangkit sampai ke sistem. Untuk menentukan nilai impedansi maksimum maka dipilih tipikal seperti gambar 4.3.



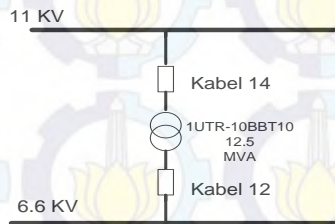
Gambar 4.3 Tipikal untuk menghitung impedansi maksimum

Dari tipikal di atas maka diperoleh :

$$\begin{aligned} Z_{max} &= Z_{19} + Z_{LINE-0AHA} + Z_{13} + Z_{1MTR-00AKT10} + Z_7 \\ &\quad + Z_{27} + A \\ &= 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} + 1,83 \times 10^{-3} + \\ &\quad + j 7,22 \times 10^{-3} + 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} \\ &\quad + 1,0425 \times 10^{-3} + j 0,04686 + 3,304 \times 10^{-4} + \\ &\quad + j 7,604 \times 10^{-3} + 1,3216 \times 10^{-5} + j 3,4048 \times 10^{-5} \\ &\quad + j 5,99 \times 10^{-3} + 2,36 \times 10^{-4} \\ Z_{max} &= \mathbf{0,00369 + j 0,0714 pu} \end{aligned}$$

4.1.4 Menentukan impedansi minimum berdasarkan *single line plant*

Nilai impedansi minimum merupakan impedansi terpendek di luar sistem atau impedansi terpendek dari generator ke beban-beban pada pembangkitan itu sendiri. Untuk menentukan nilai impedansi minimum maka dipilih tipikal seperti gambar 4.4.



Gambar 4.4 Tipikal untuk menghitung impedansi minimum

Dari tipikal di atas maka diperoleh :

$$\begin{aligned} Z_{min} &= Z_{1G-10MKA00} + Z_{28} + Z_{14} + Z_{1UTR-10BBT10} + Z_{12} \\ &= 1,3575 \times 10^{-3} + j 0,075 + 4,7082 \times 10^{-7} + j 1,08357 \times 10^{-5} \\ &\quad + 8,606 \times 10^{-4} + j 0,0146 + 7,675 \times 10^{-4} + j 9,97 \times 10^{-3} \\ &\quad + 9,075 \times 10^{-4} + j 0,01545 \\ Z_{min} &= 0,003894 + j0,115 \text{ pu} \end{aligned}$$

4.2 Menggambar kurva *capability* generator 1G-10MKA00

Generator memiliki karakteristik yang dikenal sebagai kurva *capability*, dimana perancangan kurva ini berdasarkan batas termal. Langkah – langkah untuk menggambar kurva *capability* generator 1G-10MKA00 adalah :

4.2.1 Menggambar lingkaran *stator winding limiter*

Arus jangkar/*armature* (I_a) yang mengalir pada belitan stator mengakibatkan rugi daya ($I^2 \times R$). Rugi daya ini dapat mengakibatkan

peningkatan suhu konduktor dan lingkungan terdekat. Jika dibiarkan, peningkatan suhu ini dapat terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, salah satu batasan dalam kurva *capability* generator yaitu besar arus maksimum yang dapat dibawa oleh jangkar tanpa melebihi batas pemanasan yang diizinkan.

$$S = P + jQ = \tilde{E}_t \times \tilde{I}_t^* \quad 4.1$$

$$S = |E_t| \times |I_t| \times (\cos \phi + j \sin \phi) \quad 4.2$$

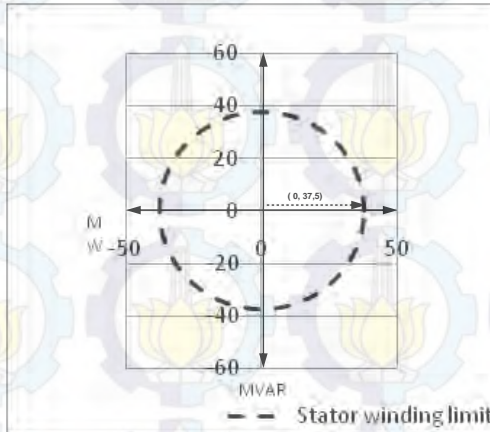
Dimana , S adalah daya semu (VA), P adalah daya aktif (Watt), Q adalah daya reaktif (VAR), E_t adalah tegangan yang dibangkitkan (V), I_t adalah arus (A).

Untuk menggambar lingkaran *stator winding limiter* , maka perlu diketahui nilai jari – jari lingkarannya. Nilai jari - jarinya adalah rating daya semu (S) dari sebuah generator.

Jari – jari lingkaran stator winding limiter = rating daya semu generator 4.3

Pusat titik lingkaran : titik (0,0) 4.4

Pada PT. Antam Pomalaa diketahui daya semu generator (S) adalah 37.500 VA atau 37,5 MVA . Maka jari – jari lingkaran stator winding = 37,5. Lingkaran *stator winding limiter* dapat diperhatikan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 *Stator winding limiter*

4.2.2 Menggambar lingkaran rotor winding limiter

Rotor winding limiter disebut juga *field current limiter*/batas arus medan. Akibat adanya pemanasan yang dihasilkan dari rugi-rugi tembaga pada belitan rotor, maka arus rotor juga menentukan batas dalam operasi generator.

Batas arus rotor dipengaruhi oleh arus eksitasi. Dimana arus eksitasi dapat dipertahankan konstan dengan mempertahankan arus searah I_f dibelitan medan konstan. Persamaan untuk mencari nilai jari-jari lingkaran rotor *winding limiter* adalah :

$$\text{Jari - jari stator end limiter} = \frac{3 \times E_a \times V_\phi}{X_s} \quad 4.5$$

$$\text{Pusat titik lingkaran: pada titik} \left(0, -\frac{3V_\phi^2}{X_s} \right) \quad 4.6$$

Dimana, E_a merupakan tegangan yang dibangkitkan oleh generator (V), V_ϕ merupakan tegangan fasa generator (V), X_s merupakan reaktansi sinkron generator (ohm).

Diketahui :

$$MVA = 37,5 \text{ MVA}$$

$$V_{L-L} = 11 \text{ KV}$$

$$V_{fasa} = 6,350853 \text{ KV}$$

$$E_a = 9,27148 \text{ KV}$$

$$X_s = 2,13 \text{ ohm}$$

$$X_{s-ohm} = \frac{11^2}{37,5} \times 2,13 = 6.8728 \text{ ohm}$$

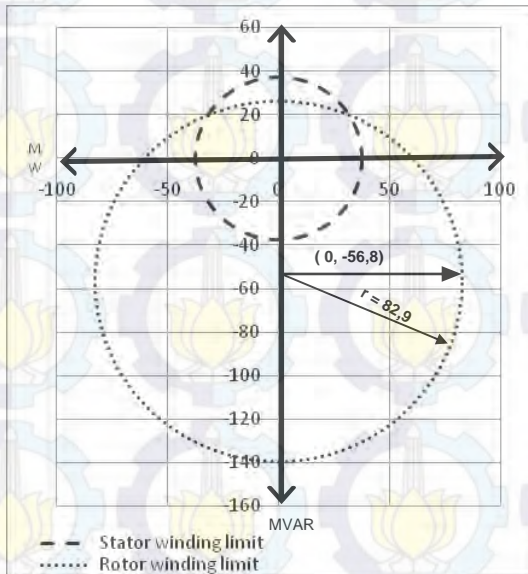
Maka jari – jari *stator end limiter* adalah

$$\text{Jari – jari stator end limiter} = \frac{3 \times E_a \times V_0}{X_s}$$

$$\text{Jari – jari stator end limiter} = \frac{3 \times 9,27148 \times 6,350853}{6.8728}$$

$$\text{Jari – jari stator end limiter} = 82,93210728$$

$$\text{Pusat titik lingkaran: pada titik } \left(0, -\frac{3 \times 6,350853^2}{6.8728}\right) = (0, -56,8075117)$$



Gambar 4.6 Kurva rotor winding dan stator winding limiter

4.2.3 Menggambar lingkaran stator end limiter

Pemanasan ujung inti stator menentukan batas operasi generator dalam daerah eksitasi lemah (daerah dibawah sumbu P). Pemanasan ujung inti stator disebabkan oleh fluks bocor di celah udara. Fluks bocor tersebut merupakan hasil penjumlahan vektor fluks arus beban di belitan stator dan fluks arus searah pada belitan rotor. Sebagian besar fluks bocor melewati celah udara antara belitan stator dan rotor dan sebagian kecil fluks bocor tetap berada pada bagian akhir dari belitan stator.

Pada saat generator beroperasi dalam kondisi eksitasi lebih maka arus medan tinggi, sehingga di cincin penahan (*retaining ring*) akan mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang kecil. Pada saat beroperasi dalam kondisi eksitasi lemah maka arus medan kecil, sehingga di cincin penahan tidak mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang tinggi. Persamaan untuk mencari nilai jari-jari lingkaran *stator end limiter* adalah :

$$\text{Pusat lingkaran : } \left(0, K_1 \frac{V_{\phi}^2}{X_s}\right) \quad 4.7$$

$$\text{Jari – jari lingkaran : } \left(3K_2 \frac{V_{\phi} \times E_a}{X_s}\right) \quad 4.8$$

$$K_1 = - \frac{(N_a \times N_f - N_f^2)}{(N_a^2 + N_f^2 - 2N_a \times N_f)} \quad 4.9$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{\Delta T}{K_t(N_a^2 + N_f^2 - 2N_a \times N_f)}} \quad 4.10$$

Dimana, E_a merupakan tegangan yang dibangkitkan oleh generator (V), V_{ϕ} merupakan tegangan fasa generator (V), X_s merupakan reaktansi sinkron generator (ohm), N_a merupakan jumlah lilitan stator, N_f merupakan jumlah lilitan rotor, ΔT merupakan suhu maksimum yang diijinkan pada bagian ujung inti stator dan rotor, K_t adalah konstanta pemanasan fluks magnetik.

Diketahui :

$$\text{MVA} = 37,5 \text{ MVA}$$

$$V_{L-L} = 11 \text{ KV}$$

$$V_{fasa} = 6,350853 \text{ KV}$$

$$E_a = 9,27148 \text{ KV}$$

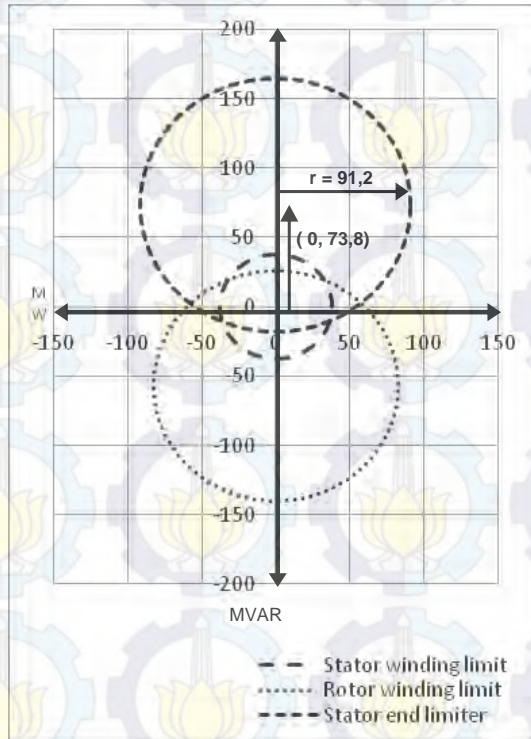
$$X_s = 2,13 \text{ pu}$$

$$X_{s-ohm} = \frac{11^2}{37,5} \times 2,13 = 6.8728 \text{ ohm}$$

Karena beberapa parameter untuk menentukan K_1 dan K_2 tidak diketahui maka untuk nilai K_1 dan K_2 dimisalkan menjadi $K_1 = 1,3$ dan $K_2 = 1,1$. Plot lingkaran *stator end limiter* dapat dilihat pada gambar 4.7.

$$\text{Pusat lingkaran : } \left(0, 3K_1 \frac{V_{\phi}^2}{X_s}\right) = (0 ; 73,848)$$

$$\text{Jari – jari lingkaran : } \left(3K_2 \frac{V_{\phi} \times E_a}{X_s}\right) = (91,2253)$$



Gambar 4.7 Kurva *stator winding limiter*, *rotor winding limiter* dan *stator end limiter*

4.2.4 Menggambar garis *steady state stability limiter* (SSSL)

Saat beroperasi dalam kondisi beban penuh, generator cenderung bekerja pada daerah *leading*, yaitu daerah yang menyerap daya reaktif dari sistem. Dalam kondisi ini, generator harus dioperasikan secara hati-hati, sehingga ditambahkan batas kestabilan *steady state* dalam daerah operasi generator. Kondisi operasi keadaan tunak tercapai jika daya output mekanik (P_m) seimbang dengan daya keluaran listrik (P_e). Apabila beban pada generator meningkat maka putaran rotor akan melambat, dan sebaliknya akan semakin cepat apabila beban menurun. Plot kurva SSSL dapat diperhatikan pada gambar 4.8.

$$\text{Titik pusat} : 0, \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s} \right) \quad 4.10$$

$$\text{Jari-jari} : \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_s} \right) \quad 4.11$$

Dimana, X_s merupakan reaktansi sinkron generator (pu), V^2 merupakan tegangan terminal generator (V), X_e merupakan reaktansi hasil penjumlahan dari reaktansi sistem dan reaktansi traformator step up (pu).

Diketahui :

$$X_s = 2,13 \text{ pu}$$

$$V = 1 \text{ pu}$$

$$X_e = 0,1301 \text{ pu}$$

$$\text{a. } X_{p.u \text{ new TR}} = X_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}} \times \left(\frac{KV_{old}}{KV_{base}} \right)^2$$

$$X_{p.u \text{ new TR}} = (0,125) \times \frac{37,5}{37,5} \times \left(\frac{11}{11} \right)^2$$

$$X_{p.u \text{ new TR}} = 0,125 \text{ pu}$$

$$\text{b. } X_{p.u \text{ new ST1}} = X_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}} \times \left(\frac{KV_{old}}{KV_{base}} \right)^2$$

$$X_{p.u \text{ new ST1}} = (0,115) \times \frac{37,5}{100} \times \left(\frac{11}{32} \right)^2$$

$$X_{p.u \text{ new ST1}} = 0,005096 \text{ pu}$$

$X_{p.u \text{ old}} = 0,005096 \text{ pu}$ ini diubah ke $KV_{base} = 11 \text{ KV}$ maka :

$$\text{c. } X_{p.u \text{ new SG}} = X_{p.u \text{ old}} \times \left(\frac{KV_{old}}{KV_{base}} \right)^2$$

$$X_{p.u \text{ new SG}} = (0,005096) \times \left(\frac{11}{11} \right)^2$$

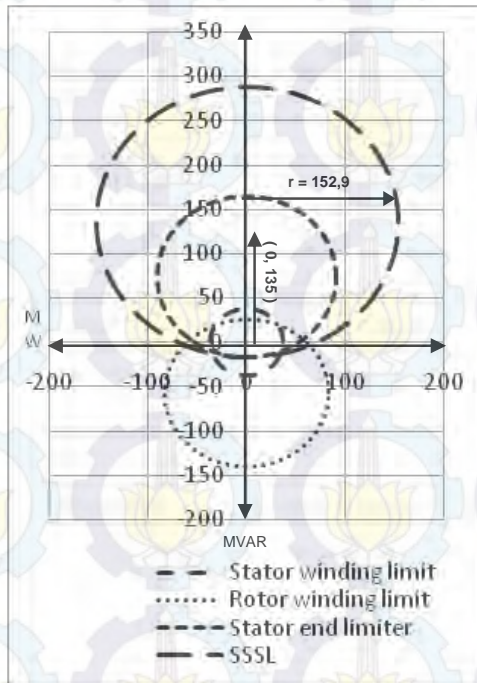
$$X_{p.u \text{ new SG}} = 0,005096 \text{ pu}$$

Maka $X_e = X_{p.u \text{ new TR}} + X_{p.u \text{ new SG}}$

$$X_e = 0,125 \text{ pu} + 0,005096 \text{ pu}$$

$$X_e = 0,1301 \text{ pu}$$

- a. $\text{Titik pusat} = 0 ; \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s} \right)$
 $\text{Titik pusat} = 0 ; \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s} \right)$
 $\text{Titik pusat} = 0 ; \frac{(1)^2}{2} \left(\frac{1}{0,1301} - \frac{1}{2,13} \right)$
 $\text{Titik pusat} = (0 ; 3,6085) \text{ pu} \times 37,5 \text{ MVA} \text{ atau } (0 ; 135,32 \text{ MVA})$
- b. $\text{Jari - jari} = \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_s} \right)$
 $\text{Jari - jari} = \frac{(1)^2}{2} \left(\frac{1}{0,1301} + \frac{1}{2,13} \right)$
 $\text{Jari - jari} = 4,0775 \text{ pu dari } 37,5 \text{ MVA} \text{ atau } 152,91 \text{ MVA}$



Gambar 4.8 Kurva stator winding limiter, rotor winding limiter, stator end limiter dan SSSL

4.2.5 Menggambar garis *Under Excitation Limiter (UEL)/ Minimum Excitation Limiter (MEL)*

Untuk menggambar garis under eksitasi (MVAR, MWATT) maka digunakan persamaan berikut ini :

$$\text{Titik MVAR} = \text{VAR pu} \times \text{MVA generator (MVAR)} \quad 4.12$$

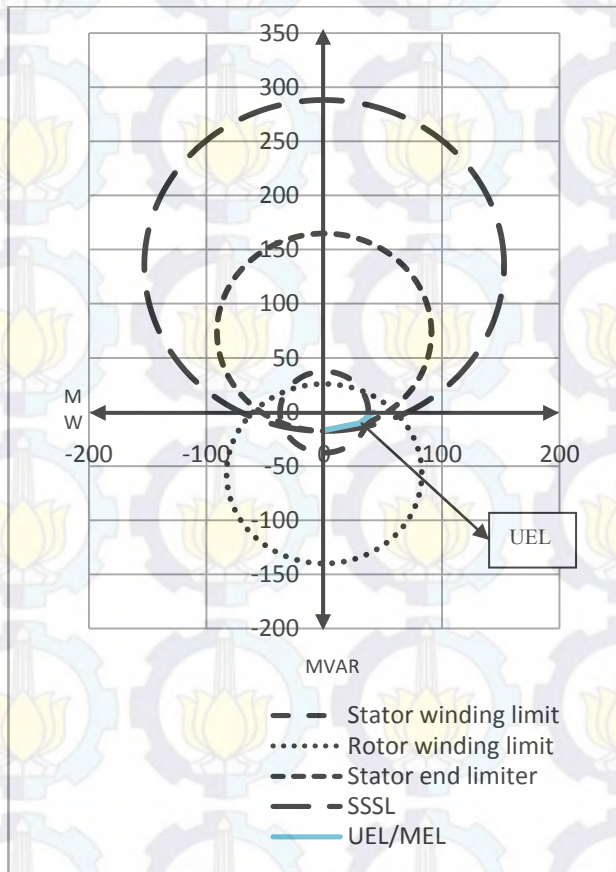
$$\text{Titik MW} = \text{WATT pu} \times \text{MVA base generator (MW)} \quad 4.13$$

Dimana, VAR (pu) dimisalkan -0,45;-0,27; 0 pu dan WATT (pu) dimisalkan 0; 0,81; 1,12 pu.

Sehingga berdasarkan persamaan 4.12 dan 4.13 diperoleh nilai MW dan MVAR pada tabel 4.1. Titik untuk menggambar garis UEL/MEL pada kurva MW-MVAR adalah (0,-16.875), (30.375,-10.125),(42,0). Garis tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9.

Tabel 4.1 Nilai MW dan MVAR

Watts pu	Var pu	MW	MVAR
0	-0.45	0	-16.875
0.81	-0.27	30.375	-10.125
1.12	0	42	0



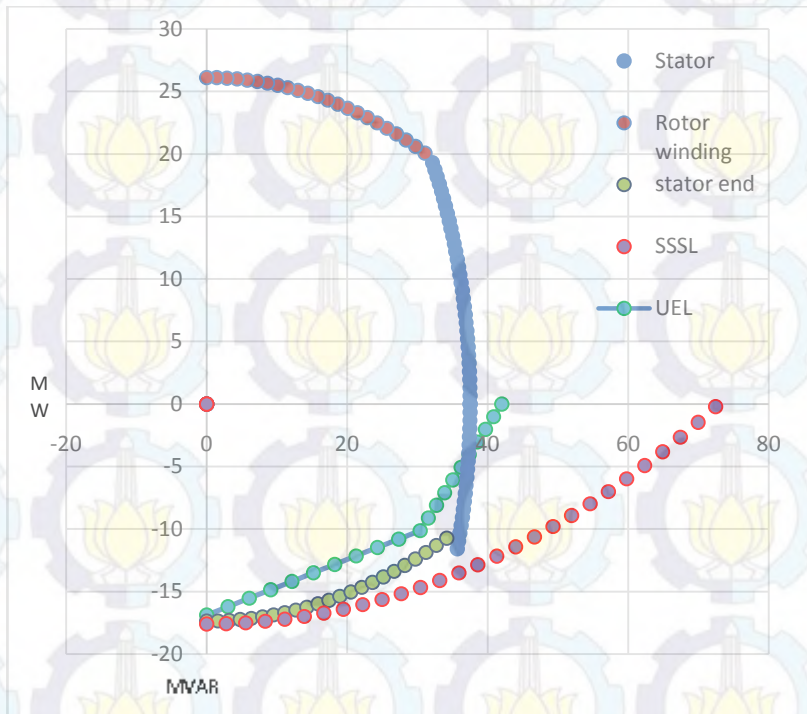
Gambar 4.9 Kurva stator winding limiter, rotor winding limiter, stator end limiter, SSSL dan UEL

4.3 Kurva *capability* generator 1G-10MKA00

Dari langkah – langkah menggambar kurva *capability* di atas, maka kurva *capability* generator 1G-10MKA00 terbentuk dari garis lingkaran *stator end limiter*, *rotor winding limiter* dan SSSL yang berpotongan pada satu titik dengan lingkaran *stator winding limiter*. Plot kurva *capability* generator dapat dilihat pada gambar 4.10.

1. Titik lingkaran *stator winding limiter* (32.14377 ; 19.31393) berpotongan dengan titik lingkaran *rotor winding limiter* (31.06691 ; 29.0858)
2. Titik lingkaran *stator winding limiter* (32.14377 ; 19.31393) berpotongan dengan titik lingkaran *stator end limiter* (-1.7 ; -17.3756)
3. Titik lingkaran *stator winding limiter* (32.14377 ; 19.31393) berpotongan dengan titik lingkaran SSSL (-2.9 ; -17.6056)

Selain dari perpotongan lingkaran – lingkaran di atas, pada kurva *capability* generator ini juga terdapat plot garis UEL/MEL. Garis ini terbentuk dari tiga titik pemisalan untuk nilai VAR dan WATT.



Gambar 4.10 Kurva *capability* generator 1G-10MKA00

4.4 Menggambar kurva R-X

Karakteristik rele LOF menggunakan 2 *mho relay*. Karakteristik rele ini diperlihatkan pada kurva R-X. Karakteristik pertama disebut dengan *zone 1* dan karakteristik kedua disebut juga dengan *zone 2*. LOF dapat memiliki 2 metode untuk mendeteksi gangguan, dimana metode pertama disebut dengan *scheme 1* dan metode kedua disebut *scheme 2*. Koordinasi rele LOF dengan MEL (*minimum excitation limiter*) merupakan konversi kurva P-Q ke kurva R-X. Koordinasi keduanya diharapkan dapat beroperasi dengan baik ketika terjadi gangguan kehilangan eksitasi pada generator 1G-10MKA00 di PT. Antam Pomalaa.

4.4.1 Menggambar metode *scheme 1* pada kurva R-X

Scheme 1 digunakan jika terjadi gangguan yang menyebabkan MEL mengalami *undershoot* sehingga mengakibatkan VAR mengalir ke karakteristik rele LOF. Jika terjadi *undershoot*, waktu trip rele LOF tipe CEH51A diatur mulai dari 1 sampai 3 detik untuk mencegah *misoperation*. Langkah – langkah menggambar *zone 1* dan *zone 2* adalah :

4.4.1.1 *Zone 1*

Untuk menggambar *zone 1*, diameter, offset dan pusat di *zone 1* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

a. Diameter = dimisalkan 1 pu 4.14

b. Offset = $-\frac{X_d'}{2}$ 4.15

c. Pusat = $\frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$ 4.16

dimana, X_d' adalah reaktansi transien generator (ohm).

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X_d' = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

Zone 1

1. $X_{pu} = 1 \text{ pu}$, maka X_{ohm} rele = diameter adalah :

$$X_{\Omega} = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

$$X_{\Omega} = \frac{11^2 \times 1}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$X_{\Omega} = \text{diameter} = 80,6667 \Omega$$

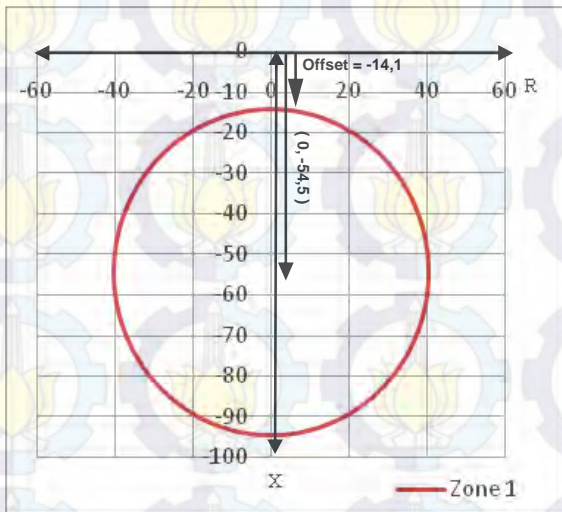
2. Offset dari lingkaran $\frac{x'd}{2} = \frac{0,35}{2} pu \text{ atau :}$

$$X_{\Omega\text{-sec}} = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

$$X_{\Omega\text{-sec}} = \frac{11^2 \times 0,175}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$X_{\Omega\text{-sec}} = \text{offset} = -14,1167 \Omega$$

3. $Pusat = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$
- $$Pusat = \frac{-14,1167 - 80,6667}{2}$$
- $$Pusat = -54,45 \Omega$$



Gambar 4.11 Kurva karateristik *mho relay* pada zone 1

4.4.1.2 Zone 2

Untuk menggambar *zone 2*, diameter, *offset* dan pusat di *zone 2* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

$$d. \text{ Diameter} = X_d' \quad 4.17$$

$$e. \text{ Offset} = -\frac{X_d'}{2} \quad 4.18$$

$$f. \text{ Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 4.19$$

Dimana, X_d' adalah reaktansi transien generator (ohm), X_d adalah reaktansi sinkron generator (ohm).

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X_d' = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

Zone 2

1. Diameter lingkaran *mho relay* adalah

$X_d = 2,13 \text{ pu}$ atau :

$$X_{\Omega} = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$
$$X_{\Omega} = \frac{11^2 \times 2,13}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

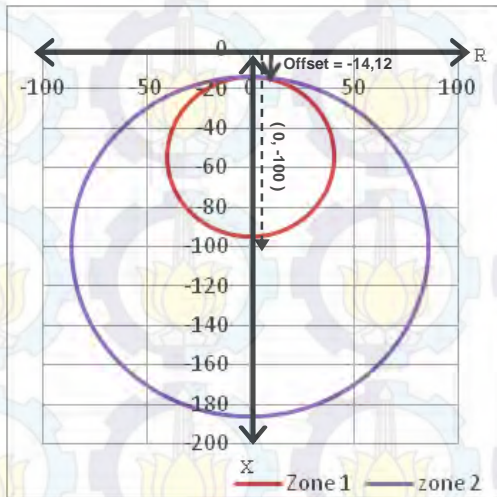
$$X_{\Omega} = \text{diameter} = 171,82 \Omega$$

2. Offset dari lingkaran *mho* ini di set sama dengan *zone 1* yaitu - 14,1167 Ω

$$3. \text{ Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$$

$$\text{Pusat} = \frac{-14,1167 - 171,82}{2}$$

$$\text{Pusat} = -100,027 \Omega$$

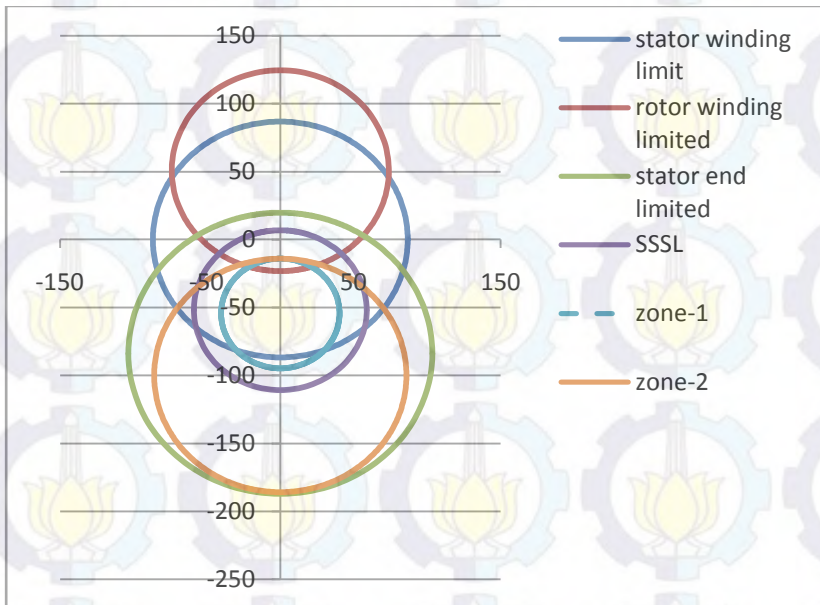


Gambar 4.12 Kurva karakteristik *mho relay* pada *zone 1* dan *zone 2* *scheme 1*

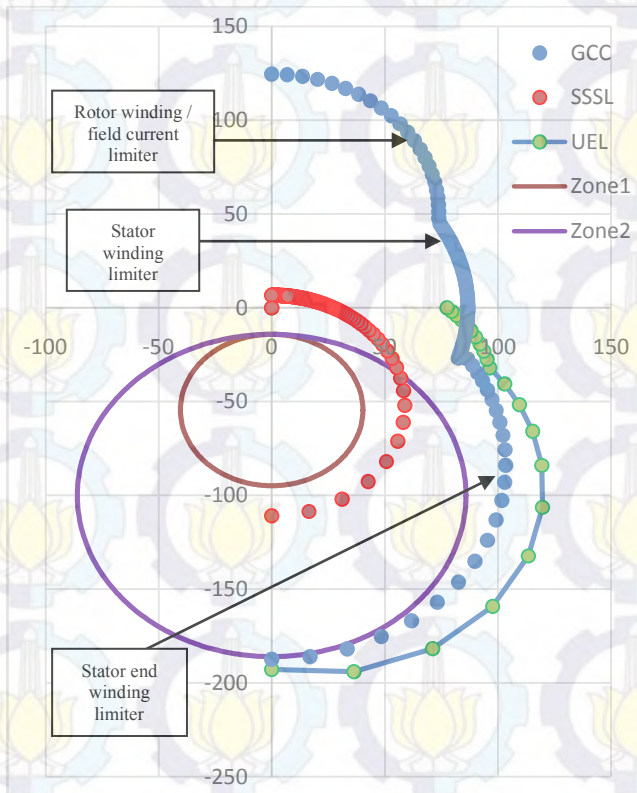
4.4.2 Kurva koordinasi *Scheme 1* dengan *capability* generator

Koordinasi *mho relay* pada *scheme 1* ditunjukkan pada gambar 4.14. Koordinasi ini merupakan konversi dari kurva P-Q ke R-X. Kurva ini menunjukkan bahwa jika terjadi gangguan LOF pada generator 1G-10MKA00 maka rele LOF dan MEL melakukan koordinasi secara tepat.

Kurva *capability* generator dalam bentuk P-Q jika di konversi ke kurva R-X akan diperlihatkan oleh gambar 4.13. Perpotongan dari garis lingkaran *stator winding limiter*, *rotor winding limiter*, dan *stator end limiter* merupakan gambar kurva *capability* generator pada kurva R-X. Jika gambar 4.13 disederhanakan maka akan menjadi gambar 4.14.



Gambar 4.13 Koordinasi kurva karakteristik *mho relay* pada *scheme 1* dan *capability* generator



Gambar 4.14 Koordinasi kurva karateristik *mho relay* pada *scheme 1* dan *capability* generator yang telah disederhanakan

Jika terjadi gangguan internal dari generator (bagian eksitasi) dan mencapai batas *steady state stability limit* (SSSL) maka LOF akan bekerja. Jika swing atau ayunan pada rotor terjadi ketika pelepasan beban maka akan mengakibatkan lepas sinkron, sehingga diharapkan MEL yang bekerja. Semua parameter – parameter yang terdapat pada kurva *capability* (P-Q) dikonversi ke kurva R-X dengan menggunakan persamaan :

$$Z_{relay} = \frac{(KV)^2 \times R_c}{MVA \times R_v} \quad 4.20$$

$$MVA = \frac{(KV)^2}{Z_{relay}} \times \frac{R_c}{R_v} \quad 4.21$$

dimana :

Z_{relay} = impedansi rele (ohm)

KV = Tegangan system

MVA = Kapasitas generator (MVA)

R_c = Rasio arus

R_v = Rasio tegangan

Pada *scheme 1* zona 1 disetting dengan waktu tunda yang lebih cepat dari pada *zone 2*, karena *zone 1* bekerja untuk mendeteksi gangguan yang besar pada kondisi *under* eksitasi. Waktu tunda yang digunakan sekitar 1-3 detik sebelum *misoperation*.

4.4.3 Menggambar metode *scheme 2* pada kurva R-X

Pada metode *scheme 2* ini tidak hanya mengamankan gangguan LOF yang berasal dari internal generator tetapi dapat mengamankan gangguan yang menuju sistem dan trafo yang berada setelah wilayah yang diproteksi. Parameter yang digunakan untuk penghitungan setting *zone 1* dan *zone 2* pada *scheme 2* yaitu reaktansi sinkron dan reaktansi *transient* generator. Langkah – langkah menggambar *zone 1* dan *zone 2* adalah :

4.4.3.1 *Zone 1*

Untuk menggambar *zone 1*, diameter, *offset* dan pusat di *zone 1* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

$$g. \text{ Diameter} = \frac{1,25 \times X_d' - X_d'}{2} \quad 4.22$$

$$h. \text{ Offset} = -\frac{X_d'}{2} \quad 4.23$$

$$i. \text{ Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 4.24$$

dimana X_d' adalah reaktansi transien generator (ohm), X_d adalah reaktansi sinkron generator (ohm)

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X_d' = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

1. Diameter lingkaran dalam pu :

$$Z_{1\text{diameter}} = 1,25 \times X_d - \frac{X_d'}{2}$$

$$Z_{1\text{diameter}} = 1,25 \times 2,13 - \frac{0,35}{2}$$

$$Z_{1\text{diameter}} = 2,4875 \text{ pu atau :}$$

$$X_\Omega = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

$$X_\Omega = \frac{11^2 \times 2,4875}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$X_\Omega = \text{diameter} = 200,66 \Omega$$

2. Offset zone 1 di set :

$$Z_{1\text{offset}} = -\frac{X_d'}{2}$$

$$Z_{1\text{offset}} = -\frac{0,35}{2}$$

$$Z_{1\text{offset}} = -0,175 \text{ pu atau :}$$

$$X_{\Omega} = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

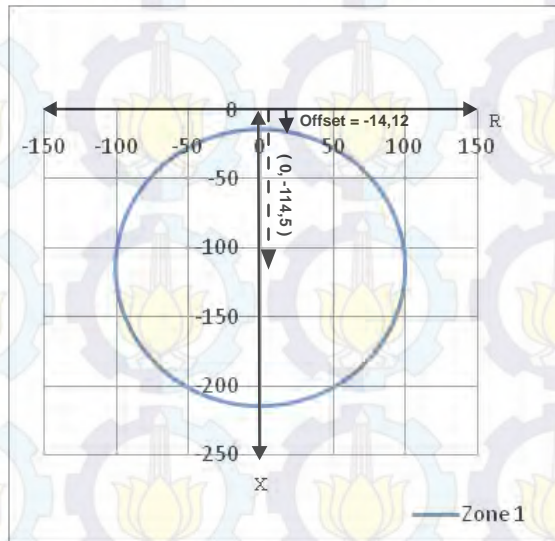
$$X_{\Omega} = \frac{11^2 \times 0,175}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$X_{\Omega} = -14,1167 \Omega$$

$$3. \text{ Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$$

$$\text{Pusat} = \frac{-14,1167 - 200,66}{2}$$

$$\text{Pusat} = -114,446 \Omega$$



Gambar 4.15 Kurva karakteristik *mho relay* pada *zone 1* *scheme 2*

4.4.3.2 Zone 2

Untuk menggambar *zone 2*, diameter, *offset* dan pusat di *zone 2* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

$$j. \text{ Diameter} = 1.25 \times X_{TG} + X_d + X_{min_{SG}} \quad 4.23$$

$$k. \text{ Offset} = X_{TG} + X_{min_{SG}} \quad 4.24$$

$$l. \text{ Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 4.25$$

dimana X_{TG} adalah reaktansi trafo pada generator *base* (ohm), X_d adalah reaktansi sinkron generator (ohm), $X_{min_{SG}}$ adalah reaktansi minimum trafo pada generator *base* (ohm).

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X'_d = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

Agar proteksi pada saat operasi under eksitasi dapat bekerja dengan baik maka diset 125% dari reaktansi sistem.

1. Diameter lingkaran dalam pu :

$$Z_{2_{diameter}} = 1,25 \times X_d + X_{p.u \text{ new } TR} + X_{p.u \text{ new } SG}$$

$$Z_{2_{diameter}} = 1,25 \times 2,13 + 0,125 + 0,005096$$

$$Z_{2_{diameter}} = 2,792 \text{ pu atau :}$$

$$Z_{\Omega} = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

$$Z_{\Omega} = \frac{11^2 \times 2,792}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$Z_{\Omega} = \text{diameter} = 225,22 \Omega$$

2. Offset zone 2 adalah :

$$Z_{2\text{offset}} = X_{p.u \text{ new TR}} + X_{p.u \text{ new SG}}$$

$$Z_{2\text{offset}} = 0,125 + 0,005096$$

$$Z_{2\text{offset}} = 0,1301 \text{ pu atau :}$$

$$X_{\Omega} = - \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

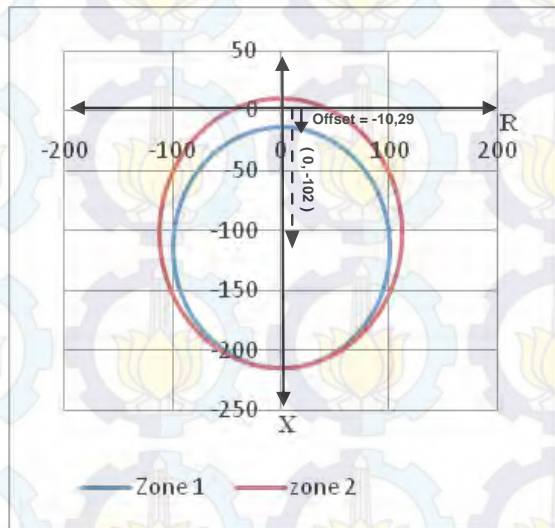
$$X_{\Omega} = - \frac{11^2 \times 0,1301}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$X_{\Omega} = -10,49 \Omega$$

3. Pusat = $\frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$

$$\text{Pusat} = \frac{-10,49 - 225,22}{2}$$

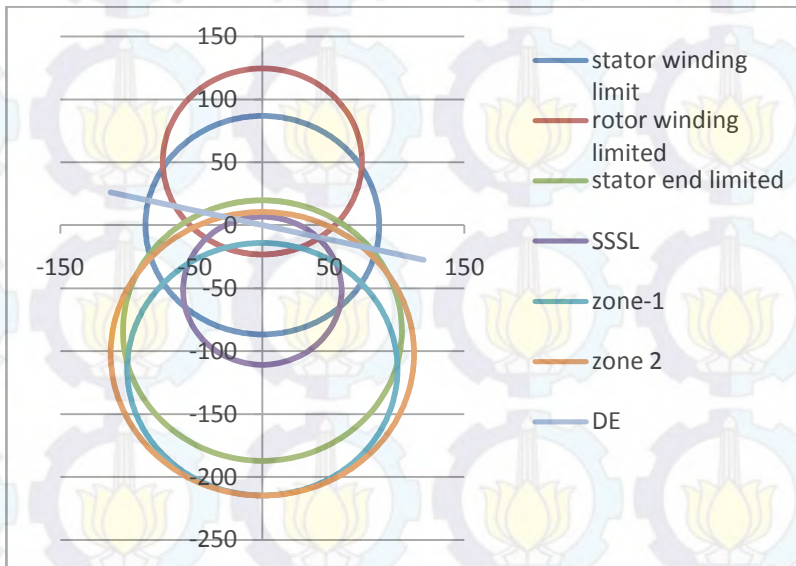
$$\text{Pusat} = -102,14 \Omega$$



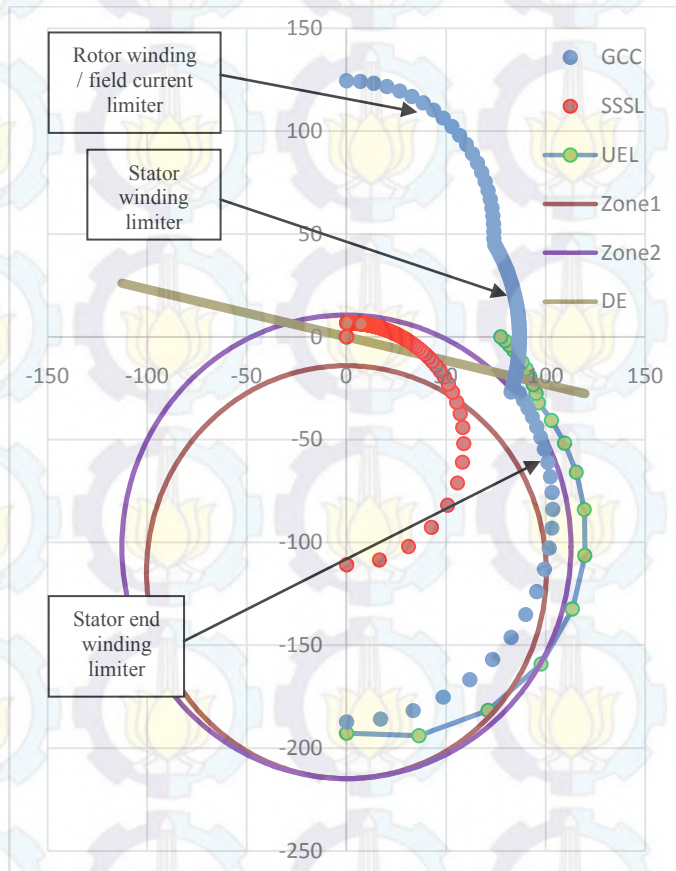
Gambar 4.16 Kurva karakteristik mho relay pada zone 1 dan zone 2 scheme 2

4.4.4 Kurva koordinasi *scheme 2* dengan *capability generator*

Kurva koordinasi *scheme 2* dengan *capability generator* ditunjukkan pada gambar 4.18. Pada *scheme 2* ini, ketika *zone 2* berada pada *offset* positif, *directional elemen* (DE) berfungsi mencegah gangguan yang menuju ke trafo dan sistem. DE secara umum diset antara sudut 10° dan 20° . Pada *scheme 2* ini diset dengan sudut sebesar 13° . Waktu tripping pada *zone 2* disetting sebesar 0,25 detik. Kurva koordinasi *scheme 2* dengan *capability generator* terbentuk dari perpotongan garis lingkaran *stator winding limiter*, *rotor winding limiter*, dan *stator end limiter* pada satu titik. Koordinasinya dapat dilihat pada gambar 4.17, kemudian disederhanakan menjadi gambar 4.18.



Gambar 4.17 Koordinasi kurva karakteristik *mho relay* pada *scheme 2* dan *capability generator*



Gambar 4.18 Koordinasi kurva karakteristik *mho relay* pada *scheme 2* dan *capability* generator yang telah disederhanakan

Kurva pada gambar 4.18 menunjukkan bahwa koordinasi LOF dan MEL pada metode *scheme 2* ini tidak bekerja dengan baik. Jika terjadi swing yang tidak menyebabkan lepas sinkron maka MEL tidak bekerja. Hal ini dapat dilihat dengan kurva *capability* generator dan MEL berada di dalam *zone 1*. Sehingga jika terjadi swing yang tidak menyebabkan lepas sinkron maka generator 1G-10MKA00 akan *off*.

4.5 Koordinasi rele LOF dengan rele jarak (*back up*)

Prinsip dasar rele jarak adalah berdasarkan rasio perbandingan tegangan dan arus gangguan yang terukur pada lokasi rele yang terpasang untuk menentukan apakah gangguan yang terjadi berada di dalam atau luar *zone* yang diproteksinya. Rele jarak pada proteksi LOF ini digunakan sebagai *back up* atau sebagai rele cadangan saat terjadi gangguan.

Relay jarak dengan karakteristik mho menggunakan satu atau dua *zone*. Masing – masing *zone* menggunakan persyaratan yang berbeda – beda. Syarat setting *zone* 1 diasumsikan dengan adanya kesalahan – kesalahan seperti penyetelan *zone* 1 sebelumnya (CT error atau PT error) maka sebagai *back up* perlu disetting berdasarkan 2 kondisi yaitu penyetelan minimum dan maksimum :

1. Penyetelan minimum = 120% dari impedansi yang diamankan (impedansi yang digunakan impedansi trafo).
2. Penyetelan maksimum = set 80% dari *Zona* 1 yang merupakan saluran transmisi terpendek kemudian ditambah dengan reaktansi trafo step up.

Sedangkan *zone* 2 pada umumnya disetting lebih kecil dari 3 persyaratan berikut ini :

1. Penyetelan minimum = 120% dari reaktansi saluran transmisi terpanjang
2. 50 sampai 67% reaktansi dari generator ke beban. Batas generator mengalami *full load* jika diset 150 sampai 200% impedansi dari generator ke beban.
3. Penyetelan maksimum = 80 sampai 90% reaktansi dari generator ke beban pada sudut torsi maksimum *zone* 2 (digunakan 85°).

4.5.1 Setting *zone* 1

Setting *zone* 1 terdiri dari 2 kriteria yaitu :

4.5.1.1 *Criteria* 1

120 % dari $X_{p.u\ new TR} = 0,125\ pu$, diubah dalam bentuk ohm :

$$X_{\Omega \text{ new } TR} = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

$$X_{\Omega \text{ new } TR} = \frac{11^2 \times 0,125}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$X_{\Omega \text{ new } TR} = 10,083 \Omega$$

$$Z_{1r} = 1,20 \times 10,083 = 12,09 \Omega$$

4.5.1.2 Criteria 2

Set 80 % dari setting saluran paling pendek kemudian ditambah dengan impedansi trafo step up. Impedansi saluran paling pendek pada sistem adalah $9,102 \times 10^{-3} pu$:

$$X_{p.u \text{ new } SLG} = X_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}} \times \left(\frac{KV_S}{KV_{Thigh}} \right)^2 \times \left(\frac{KV_{TLOW}}{KV_G} \right)^2$$

$$X_{p.u \text{ new } SLG} = (9,102 \times 10^{-3}) \times \frac{37,5}{100} \times \left(\frac{11}{32} \right)^2 \times \left(\frac{11}{11} \right)^2$$

$$X_{p.u \text{ new } SLG} = 4,033 \times 10^{-4} pu$$

Dikonversi ke dalam bentuk ohm :

$$X_{ohm \text{ new } SLG} = \frac{KV^2 \times X_{pu}}{MVA} \times \frac{R_c}{R_v}$$

$$X_{ohm \text{ new } SLG} = \frac{11^2 \times 4,033 \times 10^{-4}}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$X_{ohm \text{ new } SLG} = 0,0325 \Omega$$

Zone 1 merupakan 80% dari saluran maka :

$$Z_{1r} = X_{\Omega \text{ new } TR} + 0,8 \times (0,8 \times X_{ohm \text{ new } SLG})$$

$$Z_{1r} = 10,083 + 0,8 \times (0,8 \times 0,0325)$$

$$Z_{1r} = 10,1038 \Omega$$

Zone 1 paling kecil disetting 10,083 Ω pada MTA 85°

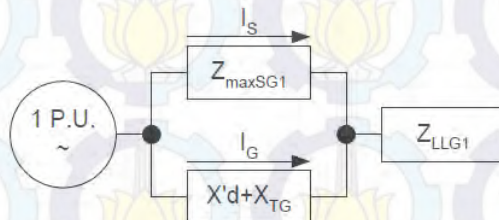
Dimana $X_{\Omega_{newTR}}$ adalah reaktansi trafo (ohm), Z_{1r} adalah eaktansi trafo pada *criteria 1*(ohm), $X_{p.u.newSLG}$ adalah eaktansi saluran terpanjang pada generator base (ohm).

4.5.2 Setting zone 2

a. Setting Zone 2

Infeed adalah pengaruh penambahan atau pengurangan arus yang melalui titik terminal terhadap arus yang melalui rele yang ditinjau. Secara umum infeed dapat disebabkan adanya pembangkit antara rele dengan titik gangguan atau dapat juga disebabkan adanya perubahan konfigurasi saluran dari saluran transmisi ganda ke tunggal atau sebaliknya. Adanya pengaruh infeed ini akan membuat impedansi yang dilihat rele menjadi lebih besar (*overreaching*) atau menjadi lebih kecil (*underreaching*).

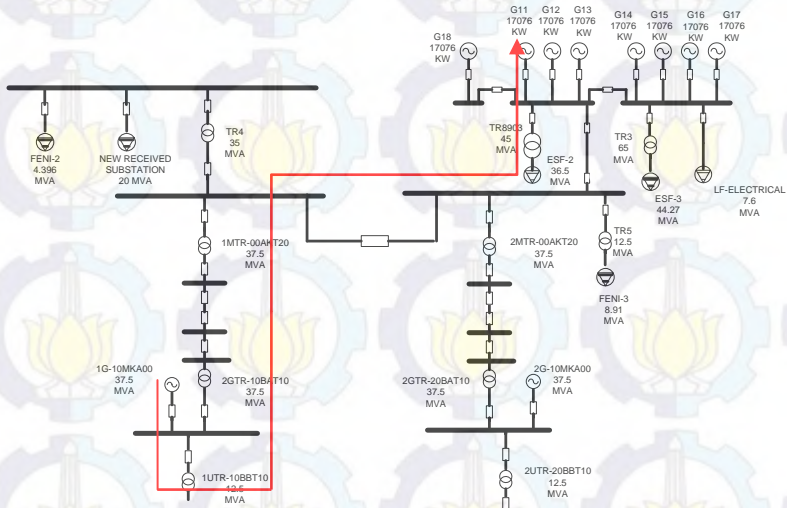
1. Criteria 1



Gambar 4.19 Saluran transmisi dari ganda ke tunggal

a. Mencari nilai $Z_{\max SG1}$

$Z_{\max SG1}$ merupakan impedansi mulai dari generator sampai ke sistem.

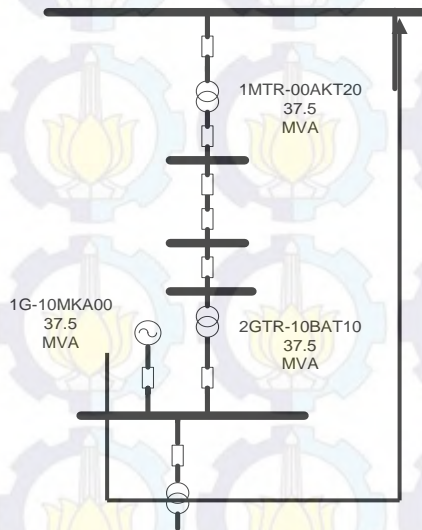


Gambar 4.20 Tipikal untuk menentukan $Z_{\max SG1}$

$$\begin{aligned}
 Z_{total} &= Z_{1G-10MKA00} + Z_{28} + Z_{21} + Z_{1GTR-10BAT10} + Z_{19} + Z_{LINE-0AHA} \\
 &\quad + Z_{kabel\ 3} + Z_{1MTR-00AKT10} + Z_{kabel\ 7} + Z_{kabel\ 27} + A \\
 Z_{total} &= 1,3575 \times 10^{-3} + j0,075 + 4,7082 \times 10^{-7} + j1,08357 \times 10^{-5} \\
 &\quad + 3,304 \times 10^{-7} + j7,604 \times 10^{-6} + 1,0425 \times 10^{-3} + j0,04686 \\
 &\quad + 1,18457 \times 10^{-4} + j1,8576 \times 10^{-3} + 1,83 \times 10^{-3} \\
 &\quad + j7,22 \times 10^{-3} + 1,18457 \times 10^{-4} + j1,8576 \times 10^{-3} \\
 &\quad + 1,0425 \times 10^{-3} + j0,04686 + 3,304 \times 10^{-4} + j7,604 \\
 &\quad \times 10^{-3} + 1,3216 \times 10^{-5} + j3,4048 \times 10^{-5} + 2,36 \times 10^{-4} \\
 &\quad + j5,99 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

$$Z_{total} = 6,091 \times 10^{-3} + j0,1933\ pu$$

- b. Mencari nilai Z_{LLG1}
 Z_{LLG1} merupakan impedansi mulai dari generator sampai ke saluran transmisi terpanjang.



Gambar 4.21 Tipikal untuk menentukan Z_{LLG1}

$$\begin{aligned} Z_{LLG1} &= Z_{1G-10MKA00} + Z_{28} + Z_{21} + Z_{1GTR-10BAT10} + Z_{19} \\ &\quad + Z_{LINE-0AHA} + Z_{cable\ 3} + Z_{1MTR-00AKT10} + Z_{cable\ 7} \\ &= 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} + 1,83 \times 10^{-3} + j 7,22 \\ &\quad \times 10^{-3} + 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} + 1,0425 \times 10^{-3} \\ &\quad + j 0,04686 + 3,304 \times 10^{-4} + j 7,604 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$Z_{LLG1} = 5,841 \times 10^{-3} + j 0,1873 \text{ pu}$$

Diketahui :

$$Z_{total} = 6,091 \times 10^{-3} + j 0,1933 \text{ pu}$$

$$X'_d = 0,35 \text{ pu}$$

$$X_{TG} = 0,125 \text{ pu}$$

$$Z_{LLG1} = 5,841 \times 10^{-3} + j 0,1873 \text{ pu}$$

$$Z_{Total} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{\max SG1}} + \frac{1}{X'_d + X_{TG}}} + Z_{LLG1}$$

$$Z_{Total} = \frac{1}{\frac{1}{6,091 \times 10^{-3} + j0,1933} + \frac{1}{0,35 + j0,125}} + (5,841 \times 10^{-3} + j 0,1873)$$

$$Z_{Total} = 0,0153 + j 0,3803$$

$$I_{total} = \frac{1}{Z_{Total}}$$

$$I_{total} = \frac{1}{0,0153 + j 0,3803}$$

$$I_{total} = 0,106 - j2,63 \text{ pu}$$

c. Arus yang mengalir di $Z_{\max SG1}$:

$$I_s = I_{total} \times \frac{X'_d + X_{TG}}{X'_d + X_{TG} + Z_{\max SG1}} I$$

$$I_s = 0,106 - j2,63 \times \frac{0,35 + j0,125}{0,35 + j0,125 + 6,091 \times 10^{-3} + j0,1933}$$

$$I_s = I - 0,81 - j2,26 I$$

$$I_s = 2,401 \text{ pu}$$

d. Arus yang mengalir di I_G :

$$I_G = I_{total} \times \frac{Z_{\max SG1}}{X'_d + X_{TG} + Z_{\max SG1}} I$$

$$I_s = 0,106 - j2,63 \times \frac{6,091 \times 10^{-3} + j0,1933}{0,35 + j0,125 + 6,091 \times 10^{-3} + j0,1933}$$

$$I_G = I - 0,91 - j0,36 I$$

$$I_G = 0,978 \text{ pu}$$

Dari criteria 1, untuk setting zone 2 adalah :

$$Z_{2_LINE} = (X_{TG} + 1,2 \left(\frac{I_s + I_G}{I_G} \right)) \times Z_{LLG1} \times X_{pu} \text{ rele kedua zone 1}$$

$$Z_{2_LINE} = (0,125 + 1,2 \left(\frac{2,401 + 0,978}{0,978} \right)) \times (5,841 \times 10^{-3} + j 0,1873) \times 80,67$$

$$Z_{2_LINE} = 15,84 \angle 72,55^\circ \text{ ohm , maksimum sudut pada zone 2 } (MTA_2) = 72,55^\circ$$

2. Criteria 2

Diketahui :

Tegangan dasar	= 11 KV
$X'd$	= 0,35 pu
X_d	= 2,13 pu
Rasio CT	= 2500/1
Rasio PT	= 11000/110
pf	= 0,85
MTA_2	= $72,55^\circ$
$RPFA$	= 85°

$$Z_{\max \text{ load}} = \frac{KV_G^2}{MVA_G} \times \frac{CT_{ratio}}{VT_{ratio}}$$

$$Z_{\max \text{ load}} = \frac{11^2}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$Z_{\max \text{ load}} = 80,67 \angle 31,79^\circ \text{ ohm } (pf = 0,85)$$

$$Z_{2_MTA} = 0,67 \times \frac{Z_{\max \text{ load}}}{\cos (MTA_2 - RPFA)}$$

$$Z_{2_MTA} = 0,67 \times \frac{80,67 \angle 31,79^\circ}{\cos (72,55^\circ - 85^\circ)}$$

$$Z_{2_MTA} = 55,35 \angle 72,55^\circ \text{ ohm}$$

3. *Criteria 3*

80 sampai 90% impedansi dari generator ke beban pada sudut torsi maksimum zone 2 (digunakan 85°).

$$Z_{GCC-MTA} = \frac{KV_G^2}{MVA_G} \times \frac{CT_{ratio}}{VT_{ratio}}$$

$$Z_{GCC-MTA} = \frac{11^2}{37,5} \times \frac{2500}{1} \times \frac{110}{11000}$$

$$Z_{GCC-MTA} = 80,67 \angle 31,79^\circ \text{ ohm} (pf = 0,85)$$

$$Z_{2MTA2} = 0,9 \times Z_{GCC-MTA} = 72,603 \angle 31,79^\circ \text{ ohm}$$

Dari ketiga criteria diatas dipilih nilai reaktansi paling kecil untuk setting rele 21 zone 2. Reaktansi terkecil yaitu pada criteria 1 sebesar $15,84 \text{ ohm}$. Reaktansi terkecil ini sangat cocok digunakan untuk mendeteksi gangguan pada saluran transmisi yang panjang.

Dimana, $Z_{\max SG1}$ adalah impedansi mulai dari generator sampai ke sistem (pu), Z_{LLG1} adalah impedansi mulai dari generator sampai ke saluran transmisi terpanjang (pu), I_{total} adalah arus gangguan di saluran transmisi yang paling panjang (pu), I_s adalah arus yang mengalir di $Z_{\max SG1}$ (pu), I_G adalah arus kontribusi yang mengalir ke generator (pu), $Z_{\max load}$ adalah impedansi *base* / dasar generator (ohm), MTA_2 adalah sudut maksimum torsi pada zone 2, Z_{2MTA} adalah reaktansi pada zone 2 padan saat kondisi 150% *full load* ketika sudut torsi maksimum 85° (ohm), $Z_{GCC-MTA}$ adalah impedansi *base* / dasar generator (ohm), Z_{2MTA2} adalah reaktansi pada zone 2 pada saat kondisi 90% *full load* ketika sudut torsi maksimum 85° (ohm)



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mozina Charles J, Reichard Michael, “*Coordination of generator protection with generator excitation control and generator capability*”,IEEE PES Copyright Material.2007
- [2] Windarhariadi Stafanus, “ Dasar Pengontrolan Sistem Eksitasi Generator Sinkron”<URL:<https://stefanuswindarhariadi.wordpress.com/2012/07/01/generator-sinkron/>>, Juli, 2012.
- [3] Subeno Edi, “ Analisa Setting Mho Rele Sebagai Proteksi Hilang Penguat Generator” <URL : <http://eprints.undip.ac.id/25442/1/ML2F097629.pdf> >, Makalah Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro UNDIP.Semarang.2002.
- [4] Elmore Walter A, “*Protective relaying teory and application*”, second edition revised and expanded.New York.10016
- [5] Reimert Donald, “*Protective relaying for power generation system*”,Taylor and Francis Group,LLC.2006.
- [6] Blackburn J.Lewis, Domin Thomas J., “*Protective relaying principles and applications*”, third edition.Taylor and Francis Group,LLC.2006.
- [7] Handoyo Wuri Eko,”Sistem Proteksi Generator Turbin Gas Pada Unit Operasi Kaltim 2 Menggunakan G60 Universal Rele PT.Pupuk Kaltim Timur”,Makalah Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro UNDIP,Semarang,Oktober,2010.
- [8] Udiklat Semarang PT.PLN (Persero), “Koordinasi Proteksi Pembangkit Dengan Grid, Makalah Edisi 1,Semarang, April, 2007.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Ada dua metode yang digunakan pada proteksi *loss of field* yaitu *scheme 1* dan *scheme 2*. *Scheme 2* merupakan pengembangan dari *scheme 1*, dengan penambahan *directional elemen* (DE) dan modifikasi kurva *capability* generator maka rele lebih sensitif bekerja ketika terjadi gangguan..Dengan demikian, *scheme 2* merupakan metode yang lebih efektif dibandingkan dengan *scheme 1*, karena selain mencegah VAR leading yang menuju ke generator *scheme 2* juga dapat mencegah gangguan yang menuju ke sistem dan trafo.
2. Berdasarkan analisis kurva koordinasi *capability* generator dengan MEL pada metode *scheme 1* dan 2, metode proteksi *loss of field* yang tepat digunakan di PT. Antam Pomalaa adalah *scheme 1*. Penerapan metode *scheme 2* di PT.Antam Pomalaa tidak efektif karena MEL dan kurva *capability* generator berada di dalam zone 1 dan zone 2 sehingga mengakibatkan rele akan trip dan generator off.

5.2 Saran

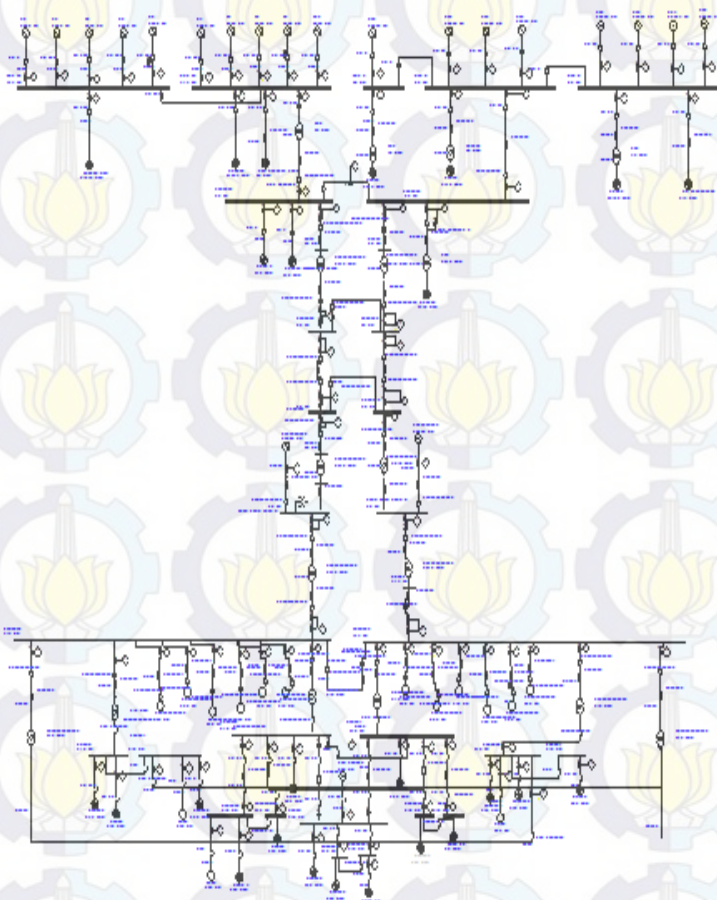
1. Setting zone 2 pada *scheme 2* sebaiknya diperkecil, dengan cara memperkecil nilai impedansi terpanjang di luar sistem. Sehingga metode *scheme 2* dapat diterapkan di PT.Antam Pomalaa.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

Lampiran -1

One-Line Diagram - OLV1 (Edit Mode)



Lampiran -2

Mengubah besaran ke dalam pu dengan MVA base = 100
MVA

1. Kabel 28

Name plate :

Panjang (L) = 57 m = 0,057 km

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,01 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,01 + j 0,23}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,00826 + j 0,1901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,00826 + j 0,1901}{1000} \times 0,057$$

$$Z_{pu} = 4,7082 \times 10^{-7} + j 1,08357 \times 10^{-5} \text{ pu}$$

2. Kabel 21

Name plate :

Panjang (L) = 40 m = 0,04 km

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,01 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$
$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$
$$Z_{pu} = \frac{0,01 + j 0,23}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,00826 + j 0,1901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,00826 + j 0,1901}{1000} \times 0,04$$

$$Z_{pu} = 3,304 \times 10^{-7} + j 7,604 \times 10^{-6} \text{ pu}$$

3. Kabel 19 = Kabel 3

Name plate :

Panjang (L) = 43 m

Tegangan Base (V_{base}) = 33 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03 + j0,47 \left(1000 \frac{\Omega}{\text{m}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(33)^2}{100} = 10,89$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_n}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,03 + j 0,47}{10,89}$$

$$Z_{pu} = 2,7548 \times 10^{-3} + j 0,0432 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{2,7548 \times 10^{-3} + j 0,0432}{1000} \times 43$$

$$Z_{pu} = 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

4. Kabel 7

Name plate :

Panjang (L) = 40 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_n = 0,01 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_n}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,01 + j 0,23}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,00826 + j 0,1901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,00826 + j 0,1901}{1000} \times 40$$

$$Z_{pu} = 3,304 \times 10^{-4} + j 7,604 \times 10^{-3} pu$$

5. Kabel 27

Name plate :

Panjang (L) = 400 m = 0,4 km

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03999 + j0,103 \left(1000 \frac{\Omega}{km} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,03999 + j 0,103}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,03304 + j 0,08512 pu$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03304 + j 0,08512}{1000} \times 0,4$$

$$Z_{pu} = 1,3216 \times 10^{-5} + j 3,4048 \times 10^{-5} pu$$

6. Kabel 35

Name plate :

Panjang (L) = 65 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03999 + j0,0998 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03999 + j 0,0998}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,03304 + j 0,08248 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03304 + j 0,08248}{1000} \times 65$$

$$Z_{pu} = 2,1476 \times 10^{-3} + j 5,36116 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

7. Kabel 33 = Kabel 37

Name plate :

Panjang (L) = 50 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03999 + j0,0998 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,03999 + j 0,0998}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,03304 + j 0,08248 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03304 + j 0,08248}{1000} \times 50$$

$$Z_{pu} = 1,652 \times 10^{-3} + j 4,124 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

8. Kabel 39

Name plate :

Panjang (L) = 750 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,0768 + j0,109 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,0768 + j0,109}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,06347 + j 0,0901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,06347 + j 0,0901}{1000} \times 750$$

$$Z_{pu} = 0,0476 + j 0,0676 \text{ pu}$$

9. Kabel 14

Name plate :

Panjang (L) = 26 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,04 + j0,68 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,04 + j0,68}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,0331 + j 0,5619 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,0331 + j 0,5619}{1000} \times 26$$

$$Z_{pu} = 8,606 \times 10^{-4} + j 0,0146 \text{ pu}$$

10. Kabel 12

Name plate :

Panjang (L) = 55 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,02 + j0,34 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$
$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$
$$Z_{pu} = \frac{0,02 + j0,34}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,0165 + j 0,28099 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,0165 + j 0,28099}{1000} \times 55$$

$$Z_{pu} = 9,075 \times 10^{-4} + j 0,01545 \text{ pu}$$

11. Kabel 32

Name plate :

Panjang (L) = 125 m

Tegangan Base (V_{base}) = 6,6 KV

$$Z_{\Omega} = 1,15 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(6,6)^2}{100} = 0,4356$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_n}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{1,15 + j0,23}{0,4356}$$

$$Z_{pu} = 2,64 + j 0,528 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{2,64 + j 0,528}{1000} \times 125$$

$$Z_{pu} = 0,33 + j 0,066 \text{ pu}$$

Trafo

a) 2GTR-10BAT10 = 1MTR-00AKT10

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,00278 + j0,12497 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 37,5 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,00278 + j 0,12497) \times \frac{37,5}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 1,0425 \times 10^{-3} + j 0,04686 \text{ pu}$$

b) TR8903

Name plate :

$$Z_{p.u\ old} = 0,00278 + j0,12497 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 45 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u\ new} = Z_{p.u\ old} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u\ new} = (0,00278 + j 0,12497) \times \frac{45}{100}$$

$$Z_{p.u\ new} = 1,251 \times 10^{-3} + j 0,05623 \text{ pu}$$

c) TR1

Name plate :

$$Z_{p.u\ old} = 0,00333 + j0,14996 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 60 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u\ new} = Z_{p.u\ old} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u\ new} = (0,00333 + j0,14996) \times \frac{60}{100}$$

$$Z_{p.u\ new} = 1,998 \times 10^{-3} + j 0,08997 \text{ pu}$$

d) TR3

Name plate :

$$Z_{p.u\ old} = 0,00333 + j0,14996 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 65 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u\ new} = Z_{p.u\ old} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,00333 + j0,14996) \times \frac{65}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 2,1645 \times 10^{-3} + j 0,0974 \text{ pu}$$

e) 1UTR-10BBT10

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,00614 + j0,07976 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 12,5 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,00614 + j0,07976) \times \frac{12,5}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 7,675 \times 10^{-4} + j 9,97 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

Generator

A. 1G-10MKA00

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,2 + j0,00362 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 37,5 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,2 + j0,00362) \times \frac{37,5}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 1,3575 \times 10^{-3} + j 0,075 \text{ pu}$$

$$\text{B. } G_{18} = G_{11} = G_{12} = G_{13} = G_{14} = G_{15} = G_{16} = G_{17}$$

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,221 + j0,00884 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 21,345 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,221 + j0,00884) \times \frac{21,345}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 1,887 \times 10^{-3} + j 0,0472 \text{ pu}$$

Transmisi – 0AHA

Name plate :

Panjang (L) = 3,1 km = 1,92 mile

Tegangan Base (V_{base}) = 33 KV

$$Z_{\Omega} = 0,010392 + j0,040968 \left(1 \frac{\Omega}{\text{mile}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(33)^2}{100} = 10,89$$

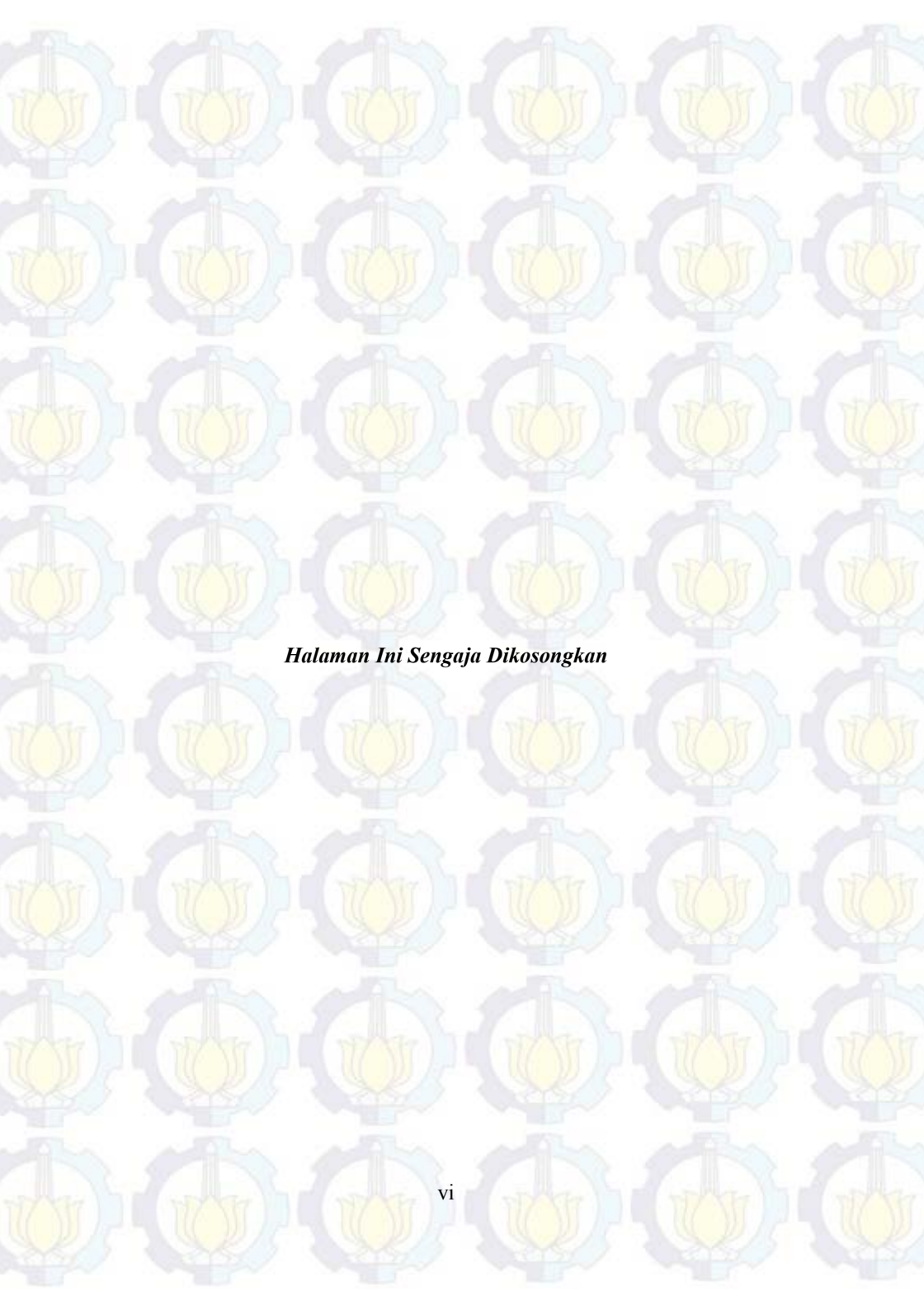
$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,010392 + j0,040968}{10,89}$$

$$Z_{pu} = 9,543 \times 10^{-4} + j 3,762 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{9,543 \times 10^{-4} + j 3,762 \times 10^{-3}}{1} \times 1,92$$

$$Z_{pu} = 1,83 \times 10^{-3} + j 7,22 \times 10^{-3} \text{ pu}$$



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

Coordination Of Generator Protection With Generator Excitation Control And Generator Capability on PT. ANTAM Sulawesi

Name : Febrina Uly Nova Silalahi
Advisor 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor 2 : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT

ABSTRACT

Integrated protection coordination system has an important role to improve the reliability of the generation system so that the continuity of the production process remains optimal. In this final project will be discussed coordination of protection taking into account the excitation generator and the generator capability curve. The aim is to protect the generator in order to avoid damage that can result in losses greater production. One of the disruption of the generator is loss of field. The loss of excitation / field resulted generator reactive power draw of the load. If the disorder is not isolated excitation is lost, it can lead to the generator will turn into a generator asynchronous / induction. Reactive power drawn from the system can exceed the generator rating, causing overload in stator windings resulting in rotation becomes high. LOF disorder can be secured by coordinating relay LOF and MEL. PT. Antam Pomalaa Southeast Sulawesi is one industry that expects pembangkitannya system can operate properly when an interruption occurs LOF. In this final project will be analyzed loss of field relay coordination with MEL PT. Southeast Sulawesi, Antam Pomalaa using two methods. Results of this analysis have been more appropriate method to be applied in PT. Antam Pomalaa Southeast Sulawesi.

Keyword: *Excitation Systems, Generator Protection Coordination,
Curve Capability*



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan kasih-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas akhir yang berjudul “ **Koordinasi Proteksi Generator Dengan Mempertimbangkan Kontrol Eksitasi Generator Dan Kurva *Capability* Generator di PT. ANTAM Sulawesi** “ diajukan guna memenuhi sebahagian persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.

Dalam tugas akhir ini dilakukan studi mengenai koordinasi proteksi generator untuk memastikan bahwa setting waktu dan daerah kerja rele dapat memberikan jaminan keamanan bagi generator pada saat kondisi asinkron karena arus eksitasi kurang dan rele tidak salah bekerja untuk kondisi abnormal di luar generator di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Pengerjaan tugas akhir ini tentu tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bpk.E.Silalahi dan Ibu L.D.M Sinaga, orangtua penulis yang selalu memanjatkan doa dan memberi semangat kepada penulis.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT., Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT., dan I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. dosen yang sabar membimbing penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
3. Teman – teman LJ 2013 gasal dan asisten LIPIST Mas Iskandar, yang telah menemani penulis berdiskusi dan menggali ilmu.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak. Penulis berharap pembaca dapat memberikan kritik dan saran bagi buku ini untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, Juni 2015

Penulis



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

JUDUL	i
PENGESAHAN	iii
ABSTRAK –ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Laporan	3
1.7 Relevansi	4
BAB II. SISTEM EKSITASI DAN PENGAMANNYA	
2.1 Sistem Eksitasi	7
2.2 Stabilitas <i>Steady State</i> Pada Generator	7
2.3 Metode Grapikal	9
2.4 Kurva <i>Capability</i>	11
2.4.1 Lingkaran <i>Stator Winding Limiter</i>	11
2.4.2 Lingkaran <i>Rotor Winding Limiter</i>	12
2.4.3 Lingkaran <i>Stator End Limiter</i>	12
2.4.4 <i>Overexcitation</i>	13
2.4.5 <i>Underexcitation</i>	13
2.4.6 <i>Steady State Stability Limited</i>	13
2.4.7 Daerah <i>Overexcitation</i>	14
2.4.8 Daerah <i>Underexcitation</i>	14
2.5 Rele <i>Loss of Field</i>	14
2.6 Konversi P-Q ke R-X	17
2.7 Koordinasi Rele <i>Loss of Field</i> Dengan <i>Minimum Excitation Limiter</i> Dan Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00...	18

BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. ANTAM POMALAA SULAWESI TENGGARA

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Antam Pomalaa	23
3.2 Jumlah Total Pembangkitan Dan Pembebanan	23
3.3 Kapasitas Pembangkitan.....	25
3.4 Sistem Distribusi PT.Antam Pomalaa	26
3.5 Beban.....	27

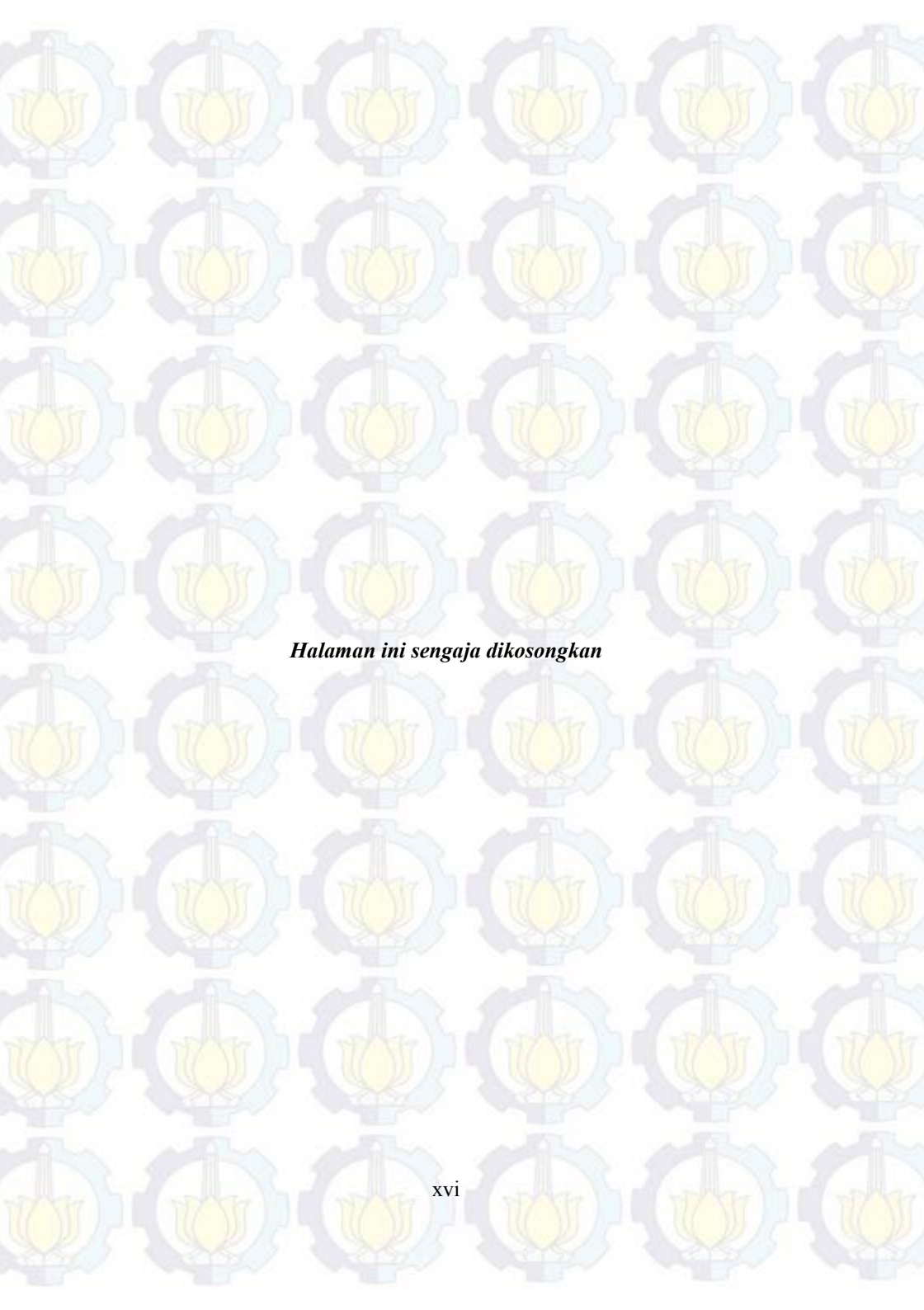
BAB IV. PERHITUNGAN KOORDINASI PROTEKSI GENERATOR DI PT. ANEKA TAMBANG (ANTAM) POMALAA SULAWESI TENGGARA

4.1 Pemilihan Tipikal Untuk Menentukan Nilai Impedansi Pada PT. Antam Pomalaa	31
4.1.1 Menentukan Impedansi Paling Pendek Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	31
4.1.2 Menentukan Impedansi Paling Panjang Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	32
4.1.3 Menentukan Impedansi Maksimum Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	33
4.1.4 Menentukan Impedansi Minimum Berdasarkan <i>Single Line Plant</i>	34
4.2 Menggambar Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00	36
4.2.1 Menggambar Lingkaran <i>Stator Winding Limiter</i>	36
4.2.2 Menggambar Lingkaran <i>Rotor Winding Limiter</i>	38
4.2.3 Menggambar Lingkaran <i>Stator End Limiter</i>	40
4.2.4 Menggambar Garis <i>Steady State Limiter</i> (SSSL)	42
4.2.5 Menggambar Garis Under Excitation Limiter / Minimum Excitation Limiter.....	43
4.3 Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00	45
4.4 Menggambar Kurva R-X.....	46
4.4.1 Menggambar Metode <i>Scheme 1</i> Pada Kurva R-X...	47
4.4.1.1 <i>Zone 1</i>	47
4.4.1.2 <i>Zone 2</i>	49
4.4.2 Kurva Koordinasi <i>Scheme 1</i> Dengan <i>Capability</i> Generator	50
4.4.3 Menggambar Metode <i>Scheme 2</i> Pada Kurva R-X...	53
4.4.3.1 <i>Zone 1</i>	53
4.4.3.2 <i>Zone 2</i>	56

4.4.4 Kurva Koordinasi <i>Scheme 2</i> Dengan <i>Capability</i> Generator	58
4.5 Koordinasi Rele LOF Dengan Rele Jarak (<i>Back up</i>)	60
4.5.1 Setting <i>Zone 1</i>	60
4.5.1.1 <i>Criteria 1</i>	61
4.5.1.2 <i>Criteria 2</i>	61
4.5.2 Setting <i>Zone 2</i>	62
4.5.2.1 <i>Criteria 1</i>	62
4.5.2.2 <i>Criteria 2</i>	66
4.5.2.3 <i>Criteria 3</i>	67
BAB V. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN 1 SLD PT ANTAM POMLAA	A-1
LAMPIRAN 2 PERHITUNGAN NILAI IMPEDANSI <i>NEW</i>	B-1
BIODATA PENULIS	C-1

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Jumlah Total Pembangkitan Dan Pembebanan	19
Tabel 3.2	Data Kapasitas Pembangkitan	21
Tabel 3.3	Generator CFPP 1G-10MKA00	21
Tabel 3.4	Data Bus	22
Tabel 3.5	Data Transformator	23
Tabel 3.6	Data Lump	23
Tabel 4.1	Nilai MW Dan MVAR	37



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kurva Stabilitas <i>Steady State</i> Generator	8
Gambar 2.2	Metode Grapikal Pada <i>Steady State Stability</i>	9
Gambar 2.3	Kurva Kapabilitas Generator	10
Gambar 2.4	Diagram Fasor Dari Arus Dan Tegangan Yang Terjadi Ketika Generator Sinkron Beroperasi	12
Gambar 2.5	Proteksi Terhadap Gangguan Hilang Penguat Generator Menggunakan Rele Mho	14
Gambar 2.6	Karakteristik Operasi Proteksi Hilang Eksitasi.....	15
Gambar 2.7	Transformasi Plot Dari MW-MVAR Ke R-X Dan R-X Ke MW-MVAR.....	16
Gambar 2.8	Setting MEL	17
Gambar 2.9	Koordinasi Dengan MEL.....	18
Gambar 3.1	<i>Single Line Diagram</i> PT. Antam Pomalaa Yang Telah Disederhanakan	20
Gambar 4.1	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Paling Pendek	25
Gambar 4.2	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Paling Panjang	26
Gambar 4.3	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Maksimum..	27
Gambar 4.4	Tipikal Untuk Menghitung Impedansi Minimum....	28
Gambar 4.5	<i>Stator Winding Limiter</i>	30
Gambar 4.6	Kurva <i>Stator winding limiter</i> Dan <i>Rotor Winding Limiter</i>	32
Gambar 4.7	Kurva <i>Stator Winding Limiter, Rotor Winding Limiter, Dan Stator End Limiter</i>	34
Gambar 4.8	Kurva <i>Stator Winding Limiter, Rotor Winding Limiter, Stator End Limiter, Dan SSSL</i>	36
Gambar 4.9	Kurva <i>Stator Winding Limiter, Rotor Winding Limiter, Stator End Limiter, SSSL, UEL</i>	38
Gambar 4.10	Kurva <i>Capability</i> Generator 1G-10MKA00	40
Gambar 4.11	Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i>	42
Gambar 4.12	Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i> Dan <i>Zone 2</i> Pada <i>Scheme 1</i>	44
Gambar 4.13	Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 1</i> Dan <i>Capability</i> Generator	45
Gambar 4.14	Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 1</i> Dan <i>Capability</i> Generator Yang	

Telah Disederhanakan	46
Gambar 4.15 Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i> <i>Scheme 2</i>	49
Gambar 4.16 Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Zone 1</i> Dan <i>Zone 2</i> <i>Scheme 2</i>	51
Gambar 4.17 Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 2</i> Dan <i>Capability</i> Generator	52
Gambar 4.18 Koordinasi Kurva Karakteristik <i>Mho Relay</i> Pada <i>Scheme 1</i> dan <i>Capability</i> Generator Yang Telah Disederhanakan	53
Gambar 4.19 Saluran Transmisi Dari Ganda Ke Tunggal	56
Gambar 4.20 Tipikal Untuk Menentukan $Z_{max SG1}$	57
Gambar 4.21 Tipikal Untuk Menentukan Z_{LL1}	58

BIODATA PENULIS



Febrina Uly Nova Silalahi lahir di Pematangsiantar, 17 Februari 1992, biasa di panggil Febrina dan merupakan anak pertama dari pasangan bapak E.Silalahi dan ibu L.D.M. Sinaga. Penulis lulus dari SMA RK Budi Mulia Pematangsiantar pada tahun 2009 dan melanjutkan pendidikan Diploma 3 Politeknik Negeri Medan di tahun 2009 jurusan Teknik Elektro dan lulus pada tahun 2012. Saat ini penulis melanjutkan pendidikan di strata satu Teknik Elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Email penulis : rina.766hi@gmail.com.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem koordinasi proteksi yang terpadu memiliki peranan yang penting pada sebuah industri. Tujuannya adalah untuk melindungi generator agar tidak terjadi kerusakan yang dapat mengakibatkan kerugian produksi yang lebih besar. Pada dasarnya gangguan dapat terjadi karena kegagalan operasi peralatan dalam sistem dan kesalahan manusia. Sistem proteksi generator dan nilai settingnya, ditetapkan dengan memperhatikan batasan kemampuan operasi generator serta batasan operasi sistem.

Dilihat dari daerah kerja dan kecepatan operasinya, proteksi generator dibedakan dalam dua kelompok. Pertama, proteksi yang daerah kerjanya terbatas hanya mencakup peralatan tertentu dan tidak responsif terhadap yang terjadi di luar daerah kerjanya serta bekerja seketika. Proteksi dengan sifat ini biasa disebut sebagai proteksi unit (*unit protection*). Kelompok kedua adalah proteksi yang mempunyai daerah kerja lebih luas dan dapat bekerja (responsif) oleh pengaruh kondisi abnormal yang berasal dari luar generator. Proteksi kelompok ini bekerja lebih lambat (tidak seketika).

PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara memiliki sistem proteksi generator yang sudah tua dan sering terjadi gangguan. Salah satu jenis gangguan yang timbul pada generator adalah kehilangan eksitasi / *loss of excitation* pada rotor. Terjadinya kehilangan eksitasi/medan mengakibatkan generator menarik daya reaktif dari beban. Jika gangguan hilang eksitasi tidak diisolir, dapat mengakibatkan sudut phasa arus mendahului terhadap tegangan sehingga generator akan berubah menjadi generator asinkron/induksi. Daya reaktif yang diambil dari sistem ini dapat melebihi rating generator sehingga menimbulkan kerusakan mekanis yaitu kerusakan turbin diikuti kerusakan generator yang berakibat fatal. Akibat lain yang ditimbulkan adalah daya reaktif yang diambil dari sistem ini akan dapat melebihi rating generator sehingga menimbulkan *overload* pada belitan stator dan *overheat* yang mengakibatkan penurunan tegangan generator.

Oleh karena itu, untuk menghindari terjadinya kehilangan kuat medan/eksitasi maka perlu direncanakan penggantian peralatan proteksi generator dengan menggunakan rele *loss of field*. Tujuannya untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi sehingga kontinuitas proses

produksi tetap optimal. Penggantian peralatan proteksi ini juga bertujuan untuk memperbarui teknologi rele yang digunakan. Rele elektromekanik yang ada saat ini perlu diganti dengan rele numerik yang memiliki lebih presisi dan setting rele akan lebih fleksibel. Sehubungan dengan hal tersebut, maka tugas akhir ini difokuskan pada studi koordinasi proteksi generator untuk mengetahui setting rele yang tepat pada sistem proteksi *loss of field* di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

1.2 Perumusan Masalah

Setiap industri khususnya PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara selalu mengharapkan sistem pembangkitannya dapat beroperasi dengan baik, sehingga industri tersebut dapat melaksanakan proses produksi dengan lancar. Akan tetapi jika sistem pembangkitannya mengalami gangguan, secara khusus gangguan *loss of field* maka dapat mengakibatkan generator *off* dan proses produksi akan terganggu. Oleh karena itu, perlu untuk di analisa bagaimana setelan dan koordinasi rele *loss of field* (LOF) dengan *minimum excitation limiter* (MEL) yang tepat pada sistem kelistrikan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah koordinasi rele LOF dengan *minimum excitation limiter* (MEL) di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara. Analisa perhitungan koordinasi ini menggunakan dua metode yaitu *scheme 1* dan *scheme 2*. Kemudian hasil perhitungannya diplot ke Ms.Excel.

1.4 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan memilih metode yang tepat digunakan untuk mengamankan gangguan *loss of field* pada generator di PT. ANTAM Pomalaa, agar ketika terjadi gangguan tersebut generator secara langsung tidak *off*. Sehingga keamanan peralatan dan keperluan operasi sistem juga dapat dipenuhi secara optimal.

1.5 Metodologi

Sebelum menganalisa koordinasi rele LOF dan MEL, hal yang dilakukan pertama kali yaitu mempelajari buku serta referensi yang berhubungan dengan sistem eksitasi generator, rele loss of field dan koordinasi rele LOF dan MEL. Hal ini dilakukan untuk menambah pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi dan mengetahui langkah-langkah dalam menyelesaikan permasalahan tersebut.

Pengumpulan data - data mengenai sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara meliputi *single line diagram* dan data peralatan seperti rating generator, motor, bus, trafo dan lainnya.

Kemudian melakukan analisa yakni perhitungan manual impedansi berdasarkan tipikal yang digunakan pada sistem kelistrikan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara meliputi penghitungan impedansi line transmisi yang terpanjang dan terpendek, impedansi seluruh sistem, impedansi dengan sumber paling lemah, mencari jari – jari dan titik pusat lingkaran untuk menggambar kurva *capability* generator dan koordinasi rele LOF dan MEL. Perhitungan untuk menggambar kurva koordinasinya berdasarkan dua metode yaitu *scheme 1* dan *scheme 2*.

Pengeplotan kurva *capability* generator dan koordinasi rele LOF dengan MEL dilakukan dengan menggunakan Ms.Excel. Kurva koordinasi tersebut kemudian dianalisa dan dipilih yang paling efisien digunakan di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Laporan tugas akhir berisi hasil analisis koordinasi rele LOF dengan MEL. Dengan nilai setting yang telah didapatkan, diharapkan sistem proteksi dapat bekerja dengan cepat dan selektif ketika terjadi gangguan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terdiri dari lima bagian dan masing – masing bab akan dijelaskan sebagai berikut.

Bab 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang pembuatan tugas akhir, permasalahan yang akan diangkat, tujuan, metodologi penulisan dan sistematika penulisan tugas akhir.

Pada bab 2 berisi tentang sistem eksitasi dan pengamannya. Bab ini berisi teori - teori penunjang yang menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Bab 3 membahas tentang sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara meliputi bagaimana konfigurasinya serta beberapa hal mengenai operasi sistem tenaga listrik di PT. Antam Pomalaa Sulawesi Tenggara.

Bab 4 merupakan penghitungan koordinasi proteksi generator di PT. Aneka Tambang (ANTAM) Pomalaa Sulawesi Tenggara. Dalam bab ini menyajikan analisis terhadap koordinasi proteksi yang baru ketika terjadi gangguan LOF sehingga menghasilkan koordinasi proteksi LOF yang tepat. Kemudian mengplot hasil perhitungan manual ke ms.excel untuk memperoleh grafik kurva *capability* generator, dan koordinasi rele LOF dengan MEL pada kurva R-X. Bab 5 adalah penutup yang berisi kesimpulan, saran dan rekomendasi dari hasil analisis yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat seperti, dapat memperbaiki koordinasi rele LOF dan MEL di Aneka Tambang (ANTAM) Pomalaa Sulawesi Tenggara sehingga sistem proteksinya lebih selektif. Selain itu, tugas akhir ini dapat menjadi referensi mahasiswa lain yang hendak mengambil tugas akhir serupa.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 2

SISTEM EKSITASI DAN PENGAMANNYA

2.1 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi bertujuan untuk mempertahankan generator agar tetap sinkron. Selain itu, sistem eksitasi juga mempengaruhi jumlah daya reaktif yang dibangkitkan dan diserap generator. Semakin bertambah arus eksitasi maka daya reaktif juga akan bertambah. Pada sistem eksitasi juga ada hubungan antara tegangan terminal VT dan daya reaktif Q. Ketika muatan lambat ditambahkan pada generator sinkron, tegangan terminalnya akan menurun. Sebaliknya, ketika muatan utama ditambahkan pada generator sinkron, maka tegangan terminalnya akan naik.

Secara umum alat yang digunakan untuk mengontrol tegangan pada generator adalah AVR (*automatic voltage regulator*). Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (eksitasi) pada *exciter*. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan (eksitasi) pada *exciter*. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (eksitasi) pada *exciter*. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis. AVR mengatur arus eksitasi yang besar pada *over excitation limiter* (OEL). OEL merupakan batas arus eksitasi sebelum generator beroperasi *overload*. AVR juga mengatur arus eksitasi pada *under excitation limiter* (UEL) misalnya saat kehilangan eksitasi pada generator sinkron.

2.2 Stabilitas *Steady State* Pada Generator

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil. Pada kondisi stabil maka osilasi akan tetap terjadi sampai akhirnya berada pada posisi tertentu untuk kondisi yang baru.

Sistem eksitasi generator akan peka terhadap perubahan tegangan yang menyebabkan osilasi sudut rotor dan memperkuat atau memperlemah medan generator, sehingga mempengaruhi kecepatan

mesin untuk mencapai kondisi operasi yang stabil. Kondisi seperti itu akan selalu ada pada sistem tenaga listrik karena beban yang ada akan selalu bertambah, dan semua generator yang terinterkoneksi harus selalu menyesuaikan energi input, sudut rotor, dan eksitasi agar sesuai dengan kondisi pada saat itu juga.

Ketika daya yang dibawa ke beban pada saluran transmisinya sangat kecil, maka akan menimbulkan rugi-rugi yang mengakibatkan ketidakstabilan. Gambar 2.1 mengilustrasikan bagaimana ketidakstabilan *steady state* terjadi pada sebuah sistem sederhana tanpa adanya rugi-rugi. Daya aktif yang dikirim dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$P_e = \frac{E_g E_s}{X} \sin(\theta_g - \theta_s) \quad 2.1$$

dimana :

P_e Daya aktif yang dikirim

E_g Tegangan generator

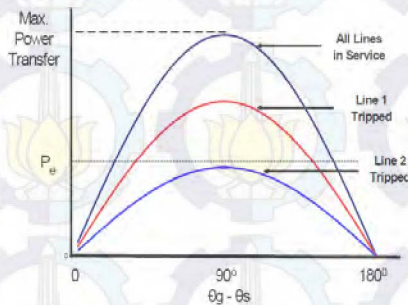
E_s Tegangan sistem

X Reaktansi steady state antara generator dan sistem

θ_g sudut tegangan generator

θ_s sudut tegangan sistem

$$P_{max} = \frac{E_g E_s}{X} \quad 2.2$$



Gambar 2.1 Kurva stabilitas *steady state* generator[1]

Dari persamaan 2.2 dapat dilihat bahwa daya maksimum yang dapat ditransmisikan ketika sudut $\theta_g - \theta_s$ 90° listrik, dimana $\sin 90^\circ = 1$. Ketika sudut tegangan generator dan tegangan sistem melebihi 90° , maka daya maksimum yang ditransfer menjadi turun dan tidak cukup untuk mempertahankan sinkronisasi. Ketika line 2 trip kurva sudut $\theta_g - \theta_s$ akan turun, maka daya yang ditransfer tidak dapat dijaga dan sistem menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan *steady state* dapat terjadi bersamaan dengan tripnya *line* transmisi yang dapat meningkatkan reaktansi antara beban dengan pembangkit yang jauh. Metode grafik dapat digunakan untuk menentukan batas stabilitas *steady state* pada sebuah generator.

2.3 Metode Grapikal

Daerah kestabilan *steady state* menggambarkan kemampuan generator menyesuaikan perubahan beban. *Steady state stability limiter* (SSSL) merupakan penentuan batas maksimum dari pembangkitan generator agar pembangkit tersebut masih tetap sinkron. Jika batas SSSL ini tercapai maka pembangkit akan lepas sinkron.

Metode grafik merupakan suatu metode untuk menggambarkan SSSL. Metode ini ditunjukkan pada gambar 2.2. Persamaan untuk mencari jari-jari lingkaran SSSL adalah :

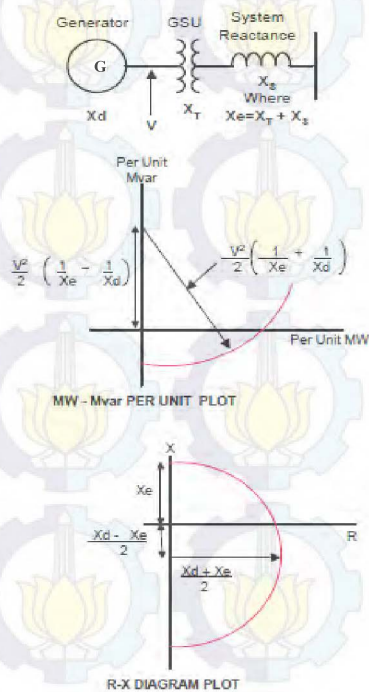
$$\text{Jari - jari lingkaran SSSL} = \frac{V}{\left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right)} \quad 2.3$$

dimana :

V = Tegangan terminal generator (V)

X_e = Reaktansi hasil penjumlahan dari reaktansi sistem dan reaktansi trafo step up (ohm)

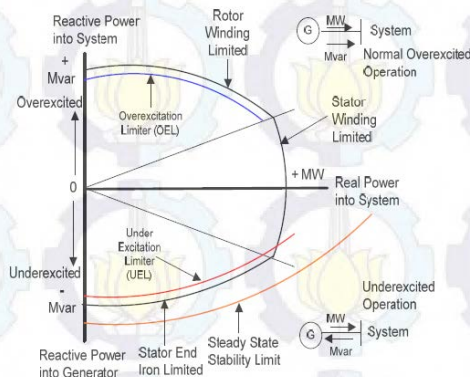
X_d = Reaktansi sinkron generator (ohm)



Gambar 2.2 Metode Grapikal pada *Steady State Stability*[1]

2.4 Kurva Kapabilitas Generator

Kurva *capability* adalah sebuah kurva yang merepresentasikan limitasi kinerja sebuah generator sinkron, baik itu limitasi internal (efek pemanasan pada lilitan stator dan rotor) maupun limitasi external (*prime-mover*/penggerak mula, atau yang lain). Secara teknis, kurva ini merupakan plot *complex power* ($S=P+jQ$) pada tegangan terminal generator yang konstan. Dengan demikian, untuk operasi yang optimal, generator harus bekerja di dalam area kurva tersebut. Kinerja di luar kurva biasanya masih diizinkan, namun untuk durasi yang sangat singkat. Kurva *capability* direpresentasikan di dalam bidang *cartesian* (x-y) dan dapat diperhatikan pada gambar 2.3. Namun sumbu-sumbunya tidak menggunakan sumbu x-y, melainkan P-Q (*real dan reactive power*).



Gambar 2.3 Kurva Kapabilitas Generator[1]

Kurva *capability* generator terbentuk dari tiga lingkaran yang saling berpotongan pada satu titik. Ketiga lingkaran tersebut adalah :

2.4.1 Lingkaran stator winding limiter

Arus jangkar / *armature* (I_a) yang mengalir pada belitan stator mengakibatkan rugi daya ($I^2 R$). Rugi daya ini dapat mengakibatkan peningkatan suhu konduktor dan lingkungan terdekat. Jika dibiarkan, peningkatan suhu ini dapat terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, salah satu batasan dalam kurva *capability* generator yaitu besar arus

maksimum yang dapat dibawa oleh jangkar tanpa melebihi batas pemanasan yang diizinkan.

2.4.2 Lingkaran rotor *winding limiter*

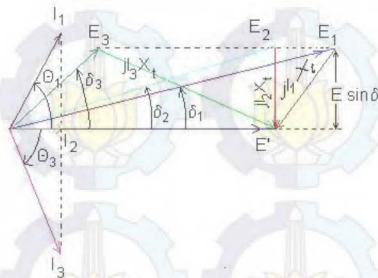
Rotor winding limiter disebut juga *field current limiter*/batas arus medan. Akibat adanya pemanasan yang dihasilkan dari rugirugi tembaga pada belitan rotor, maka arus rotor juga menentukan batas dalam operasi generator. Batas arus rotor dipengaruhi oleh arus eksitasi. Dimana arus eksitasi dapat dipertahankan konstan dengan mempertahankan arus searah I_f dibelitan medan konstan.

2.4.3 Lingkaran stator *end limiter*

Pemanasan ujung inti stator menentukan batas operasi generator dalam daerah eksitasi lemah (daerah dibawah sumbu P). Pemanasan ujung inti stator disebabkan oleh fluks bocor di celah udara. Fluks bocor tersebut merupakan hasil penjumlahan vektor fluks arus beban di belitan stator dan fluks arus searah pada belitan rotor. Sebagian besar fluks bocor melewati celah udara antara belitan stator dan rotor dan sebagian kecil fluks bocor tetap berada pada bagian akhir dari belitan stator.

Pada saat generator beroperasi dalam kondisi eksitasi lebih maka arus medan tinggi, sehingga di cincin penahan (*retaining ring*) akan mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang kecil. Pada saat beroperasi dalam kondisi eksitasi lemah maka arus medan kecil, sehingga di cincin penahan tidak mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang tinggi.

Selain itu pada kurva *capability* generator juga terdapat batas ketika *over* eksitasi, *under* eksitasi dan *steady state stability limit*.



Gambar 2.4 Diagram fasor dari arus dan tegangan yang terjadi ketika generator sinkron beroperasi. [2]

2.4.4 Keadaan eksitasi berlebih (*over excitation*)

Pada Gambar 2.4, ketika tegangan eksitasi sebesar E_1 , maka arus medan eksitasi menghasilkan terlalu banyak fluks /*over-excitation*. Fasor arus mengasumsikan posisi I_1 yang sedemikian sehingga ketika fasor $j I_1 X_t$ ditambahkan kepada fasor E_1 akan memberikan tegangan terminal E' . Hal ini menjadikan arus reaktif yang 'mendahului E_1 '/leading dialirkan dan berlaku untuk mengurangi kemagnetan (demagnetisasi) medan fluks untuk menambah kebutuhan tegangan terminal.

2.4.5 Keadaan eksitasi rendah (*under excitation*)

Ketika tegangan eksitasi adalah E_3 maka motor berada pada keadaan eksitasi-rendah (*under-excitation*). Arus keluaran pada keadaan ini diasumsikan pada posisi I_3 dan faktor daya adalah '*lagging*' atau 'arus tertinggal dari tegangan'. Keadaan arus I_3 yang tertinggal ini mempunyai efek magnetisasi yang membantu membentuk fluks celah-udara seperti yang dibutuhkan oleh tegangan terminal E' .

2.4.6 *Steady state stability limit*

Saat beroperasi dalam kondisi beban penuh, generator cenderung bekerja pada daerah *leading*, yaitu daerah yang menyerap daya reaktif dari sistem. Dalam kondisi ini, generator harus dioperasikan secara hati-hati, sehingga ditambahkan batas kestabilan *steady state* dalam daerah operasi generator. Kondisi operasi keadaan tunak tercapai jika daya output mekanik (P_m) seimbang dengan daya keluaran listrik (P_e).

Apabila beban pada generator meningkat maka putaran rotor akan melambat, dan sebaliknya akan semakin cepat apabila beban menurun.

Generator mampu menyerap atau memberikan daya reaktif, namun kemampuan ini dibatasi oleh kurva kapabilitas yang dimiliki oleh setiap generator (biasanya kurva ini sebagai acuan pada saat pengoperasian). Pada kurva *capability* terdapat 2 daerah yang masing-masing mempunyai pengertian yaitu :

2.4.7 Daerah Over Excitation

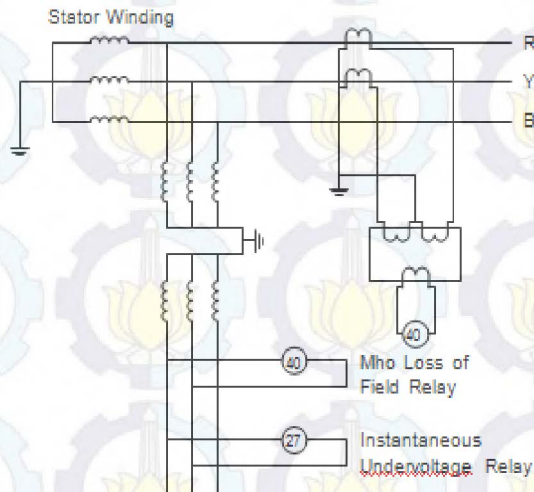
Jika generator memberikan / mensuplai daya reaktif, maka hal ini akan mengakibatkan panas yang berlebihan pada lilitan rotornya. *Over excitation* limit juga mencegah terjadinya *overheating* dari kumparan medan, dan mengurangi (arus medan) I_f .

2.4.8 Daerah Under Excitation

Jika generator menyerap daya reaktif, maka hal ini akan mengakibatkan panas yang berlebihan pada lilitan statornya. *Under excitation* limit mencegah *overheating* pada inti rotor, meningkatkan eksitasi ketika var *leading* diatas *setting* dari P-Q kurva, dan meningkatkan tegangan terminal (V_t).

2.5 Rele Loss of Field (40)

Penguatan medan akan hilang pada suatu generator sinkron, jika terjadi gangguan misalnya terbukanya saklar medan, *open circuit* dalam rangkaian medan atau gangguan pada AVR (*Automatic Voltage Regulator*). Ketika generator kehilangan arus penguatan, generator akan bekerja sebagai generator induksi. Generator juga akan berputar diatas kecepatan normal dan selanjutnya juga akan mengurangi daya semu (VA) dan menyerap daya reaktif dari sistem. Bila sistem dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif yang diperlukan, maka tegangan tidak akan terganggu, tetapi apabila tidak maka tegangan akan turun dan kestabilan generator yang terhubung paralel akan terganggu. Bila generator tetap beroperasi pada keadaan seperti ini, maka akan menimbulkan arus tidak normal pada rotor dan menghasilkan torsi yang tinggi pada rotor.



Gambar 2.5 Proteksi Terhadap Gangguan Hilang Penguat Generator Menggunakan Rele Mho[3]

Untuk mengamankan gangguan hilangnya penguatan medan maka pada generator berdasarkan standar ANSI dipakai rele *loss of excitation* (LOF) tipe CEH51A. Rele ini bekerja berdasarkan besarnya daya reaktif yang diserap sistem, diukur dari besarnya impedansi kapasitif yang ditimbulkan. Rele ini juga bekerja berdasarkan sudut antara arus dan tegangan dari daya reaktif tersebut. Semakin besar daya reaktif yang diserap, maka akan semakin besar pula impedansi yang timbul. Besarnya impedansi dinyatakan dengan besarnya jari-jari lingkaran. Untuk perhitungan *setting* rele ini cukup menggunakan konstanta mesin (reaktansi *transient* dan *subtransient*) serta tegangan sistem.

Proteksi hilang eksitasi menggunakan dua buah *mho relay* dengan karakteristik operasi berikut ini :

1. Karakteristik 1 disebut juga dengan zone 1, digunakan sebagai proteksi hilang eksitasi dengan setting kondisi beban lebih tinggi dari 30%. Digunakan *mho relay* dengan setting berikut :

$$\text{Offset} = -\frac{X_d'}{2} \quad 2.4$$

$$\text{Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 2.5$$

2. Karakteristik 2 disebut juga dengan zone 2, digunakan sebagai proteksi hilang eksitasi dengan setting pada seluruh kondisi beban. Digunakan *mho relay* dengan setting berikut :

$$\text{Diameter} = X_d \quad 2.6$$

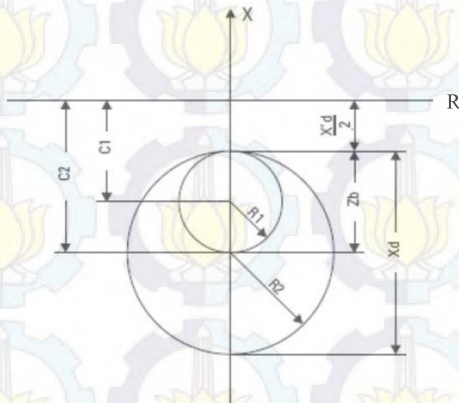
$$\text{Offset} = -\frac{X_d'}{2} \quad 2.7$$

$$\text{Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 2.8$$

dimana :

X_d Reaktansi sinkron generator

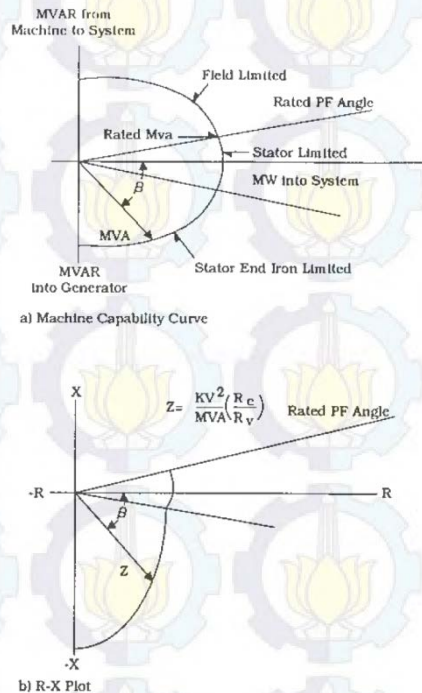
X_d' Reaktansi transien generator



Gambar 2.6 Karateristik operasi proteksi hilang eksitasi[3]

2.6 Konversi P-Q ke R-X

Karakteristik proteksi loss of field (40) umumnya diperlihatkan pada diagram R-X menggunakan metode *mho relay*. Umumnya metode ini menggunakan perbandingan dua input (dapat berupa besaran atau sudut fasa) untuk menentukan apakah gangguan yang terjadi berada di dalam atau di luar daerah kerja rele. Koordinasi *capability* generator dengan rele *loss of field* yaitu dengan mengubah kurva generator *capability* MW-MVAR (P-Q) ke kurva R-X.



Gambar 2.7 Transformasi plot dari MW-MVAR ke R-X dan R-X ke MW-MVAR[4]

$$Z_{relay}$$

$$\frac{KV}{MVA} \frac{R_c}{R_v}$$

$$2.9$$

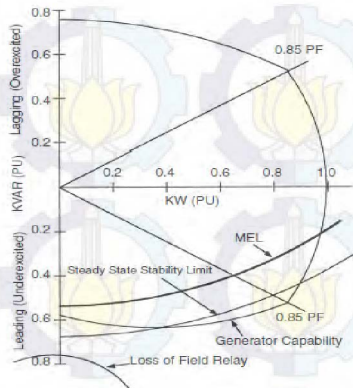
$$\frac{KV}{Z_{relay}}$$

3.1

dimana Z_{relay} adalah impedansi rele (ohm), KV adalah tegangan sistem, MVA adalah apasitas generator (MVA), Rc adalah rasio arus, Rv adalah rasio tegangan .

2.7 Koordinasi *rele loss of field* dengan *minimum excitation limiter* (MEL) dan kurva *capability* Generator 1G-10MKA00

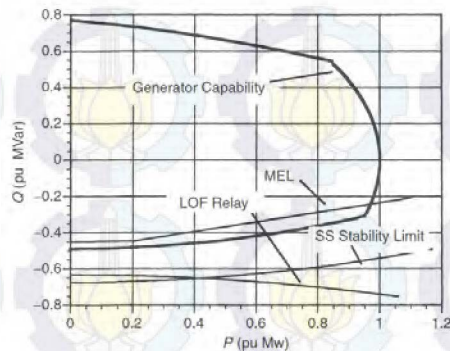
MEL adalah batas minimum eksistasi dari generator (mode leading),yang diintegrasikan dgn AVR. Ketika terjadi perubahan tegangan mengakibatkan aliran Var makin membesar ke generator maka ketika batasan MEL tercapai, AVR akan bekerja untuk menambah arus eksistasi agar tegangan generator naik sehingga Var yang mengalir ke generator berkurang. Sehingga titik kerja operasi generator tetap terjaga dalam batas kurva kapabilitas generator tersebut. Jadi MEL sebagai set point dari AVR. Jika tercapai maka AVR akan merespon.



Gambar 2.8 Setting MEL[5]

Koordinasi antara MEL dan LOF tercapai ketika karakteristik LOF tidak *overlap* terhadap MEL. Ketika terjadi swing pada sistem yang menyebabkan generator berada pada mode leading var, maka

diharapkan MEL bekerja dulu sebelum LOF relay bekerja. Swing atau ayunan pd rotor, terjadi ketika ada gangguan. Gangguan tersebut bisa berupa hubung singkat, dan pelepasan beban. Gangguan ini menyebabkan perubahan tegangan pada generator. LOF relay bekerja untuk memproteksi generator akibat hilangnya medan eksitasi yang menyebabkan tegangan generator akan turun drastis.



Gambar 2.9 Koordinasi dengan MEL[5]

Swing ada yang tidak membuat sistem lepas sinkron tapi ada juga yang menyebabkan generator bisa lepas sinkron, tergantung besar gangguan dan letak gangguan. Swing yang tidak menyebabkan lepas sinkron maka diharapkan MEL yg bekerja (AVR bekerja), tetapi jika swing itu mencapai batas *Steady state stability limit* (SSSL) maka LOF diharapkan kerja. Jadi rele LOF bekerja pada saat ada gangguan internal generator (bagian eksitasi) yg menyebabkan *loss off* eksitasi dan pada saat SSSL tercapai. Pada saat generator beroperasi mode leading maka tegangan generator akan berkurang, terlebih lagi ketika generator mengalami *loss of field*. Ketika tegangan generator berkurang, maka batas SSSL generator juga akan berkurang, yang berarti generator akan mendekati batas lepas sinkronnya.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. ANTAM POMALAA SULAWESI TENGGARA

PT. Aneka Tambang / Antam (Persero) merupakan perusahaan pertambangan yang komoditas utamanya adalah bijih nikel kadar tinggi atau saprolit, bijih nikel kadar rendah atau limonit, feronikel, emas, perak dan bauksit. Dalam menjalankan bisnisnya, PT. Antam memiliki 9 unit di Indonesia dan 1 unit di Australia. Salah satu unit di Indonesia adalah PT. Antam Pomalaa di Sulawesi Tenggara.

3.1. Sistem Kelistrikan PT. Antam Pomalaa

PT. Antam Pomalaa melayani kebutuhan suplai daya ke beban-bebannya dengan mengoperasikan 2 unit STG (*Steam Turbin Generator*) dengan kapasitas masing -masing 31,875 MW. Sistem distribusi yang digunakan adalah sistem *ring* dengan tegangan distribusi 30 kV dan 11-6,6 kV untuk tegangan menengah, dan tegangan 0,4 kV untuk tegangan rendahnya menggunakan sistem distribusi radial. *Single line diagram* sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa yang telah disederhanakan dapat dilihat pada Gambar 3.1. *Single line diagram* PT. Antam Pomalaa yang lengkap dapat dilihat di lampiran.

3.2. Jumlah Total Pembangkitan Dan Pembebanan

Jumlah total pembangkitan dan pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Jumlah Total Pembangkitan dan Pembebanan

Uraian	MW	MVAR	MVA
Source	200,358	142,32	245,76
Total Motor Load	41,4924	15,9194	44,44
Total Static Load	80,3677	17,2883	82,21



3.3. Kapasitas Pembangkitan

Sistem pembangkitan utama yang terdapat pada sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa adalah tiga unit STG (*Steam Turbin Generator*) dan delapan unit DG (*Diesel Generator*). Tiga unit STG memiliki kapasitas masing – masing 31,875 MW sedangkan delapan unit DG memiliki kapasitas masing – masing 17,076 MW. Saat kondisi normal, tiga STG dan delapan DG akan beroperasi. Data kapasitas pembangkitan tertera pada tabel 3.2 dan data generator CFPP tertera pada tabel 3.3.

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkitan

No	ID	kV	MVA	MW	pf	% eff	rpm
1.	1G-10MKA00	11	37,5	31,875	0,85	95	1500
2.	2G-20MKA00	11	37,5	31,875	0,85	95	1500
3.	G11	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
4.	G12	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
5.	G13	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
6.	G14	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
7.	G15	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
8.	G16	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
9.	G17	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500
10.	G18	11	21,345	17,076	0,8	97,72	500

Tabel 3.3 Generator CFPP 1G-10MKA00

Generator	
Kapasitas Generator	37500 KW
Tegangan Generator	11000 KV
Cos φ	0.85
Arus output	1969 A
Reaktansi Generator	
Reaktansi Sinkron (X_d)	2,13 pu
Reaktansi transient X'_d	0,35 pu
Reaktansi subtransient X''_d	0,2 pu
Speed	1500 Rpm

3.4. Sistem Distribusi PT. ANTAM POMALAA

Sistem distribusi yang digunakan ialah sistem distribusi radial dengan dua feeder utama yang dihubungkan oleh switch. Pada sistem kelistrikan PT.Antam Pomalaa tegangan output generator langsung disalurkan ke masing – masing bus beban kemudian dari tiap – tiap bus ini tegangan akan diturunkan. Tegangan dari generator 1G-10MKA00 dan 2G-10MKA20 disalurkan ke bus 11 kV sesuai dengan tegangan generator kemudian diturunkan ke tegangan 6,6 kV. Selain itu, daya dari generator juga disalurkan ke saluran dengan tegangan 30 kV menggunakan trafo step up. Lalu, tegangan ini akan diturunkan kembali ke tegangan 11 kV dan 6,6 kV untuk menyuplai beban besar. Beban – beban ini juga di suplai daya dari generator G11 sampai generator G18.

PT. Antam Pomalaa mempunyai banyak transformator untuk menyuplai beban-beban yang digunakan. Tabel 3.4 menunjukkan data beberapa bus dan table 3.5 menunjukkan data beberapa transformator daya yang ada di PT. Antam Pomalaa .

Tabel 3.4 Data bus

No	BUS	Tegangan (KV)
1	CFPP SWGR A	11
2	CFPP SWGR B	11
3	BUS C	11
4	BUS 35	11
5	00AKB10	11
6	00AKB20	11
7	00AHD10GS110	30
8	00AHD20GS110	30
9	10BBA10	6,6
10	20BBA10	6,6

Tabel 3.5 Data Transformator

No.	ID	Daya (MVA)	Tegangan (kV)	
			Primer	Sekunder
1.	2GTR-10BAT10	37,5	11	32
2.	2GTR-20BAT10	37,5	11	32
3.	1MTR-00AKT20	37,5	29	11
4.	2MTR-00AKT20	37,5	29	11
5.	TR4	35	11	6,9
6.	1UTR-10BBT10	12,5	11	6,8
7.	2UTR-20BBT10	12,5	11	6,8

3.5. Beban

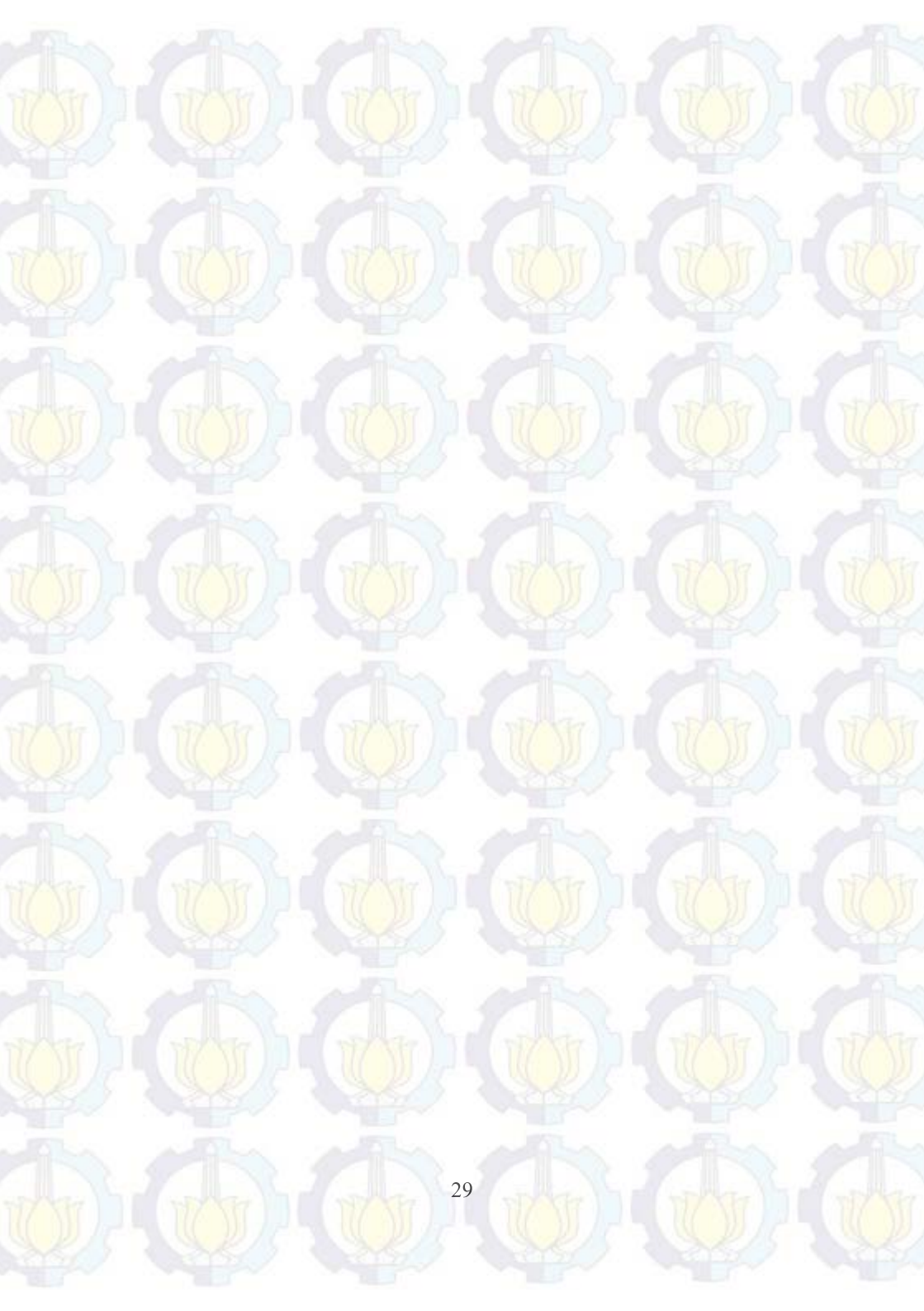
Beban – beban tenaga listrik di PT. Antam Pomalaa terdiri dari beban motor dan beban statis. Beberapa beban motor dan static di gabungkan menjadi beban lump. Pada tabel 3.6 merupakan data dari beban lump.

Tabel 3.6 Data Lump

No	ID	Rating (MW)	MVA	kV	A	% PF
1	ESF-2	36,135	36,5	33	638,6	0,99
2	ESF-3	43,827	44,27	33	774,5	0,99
3	LF- ELECTRICAL	6,08	7,6	11	398,9	0,8
4	FENI-3	8,019	8,91	6,6	779,4	0,9
5	FENI-2	3,956	4,396	6,6	384,6	0,9
6	NEW RECEIVED SUBSTATION	16,8	20	6,6	1750	0,84
7	LUMP 1	0,336	0,395	0,4	570,1	0,85
9	LUMP 2	0,119	0,140	0,4	202,1	0,85



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



BAB 4

PERHITUNGAN KOORDINASI PROTEKSI GENERATOR DI PT. ANEKA TAMBANG (ANTAM) POMALAA SULAWESI TENGGARA

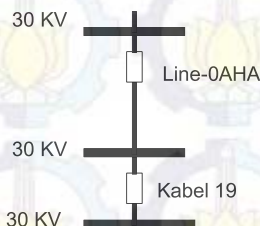
4.1 Pemilihan tipikal untuk menentukan nilai impedansi pada PT. Antam Pomalaa

Untuk mempermudah dalam melakukan setting koordinasi proteksi loss of field dengan *under excitation limiter* (UEL) / *minimum excitation limiter* (MEL) di PT. Antam Pomalaa, maka dibuat beberapa tipikal yang dapat mewakili sistem kelistrikan PT. Antam Pomalaa. Tipikal ini akan menjadi acuan dalam setting koordinasi proteksi *loss of field* dengan MEL.

Pada koordinasi pengaman kehilangan kuat medan/eksitasi PT. Antam Pomalaa dipilih beberapa tipikal yang mewakili keseluruhan sistem. Tipikal-tipikal tersebut dipilih atas dasar saluran terpanjang, saluran terpendek yang terkoordinasi dengan saluran terpanjang, line paling kuat (arus gangguan paling besar) diluar sistem dan total pemakaian sistem. Tipikal tersebut adalah :

4.1.1 Menentukan impedansi paling pendek berdasarkan *single line plant*

Nilai impedansi paling pendek merupakan impedansi terpendek pada sistem transmisi yaitu setelah trafo 2GTR-10BAT10 sampai *Line-0AHA*. Untuk menentukan nilai impedansi paling pendek maka dipilih tipikal seperti gambar 4.1.



Gambar 4.1 Tipikal untuk menghitung impedansi paling pendek

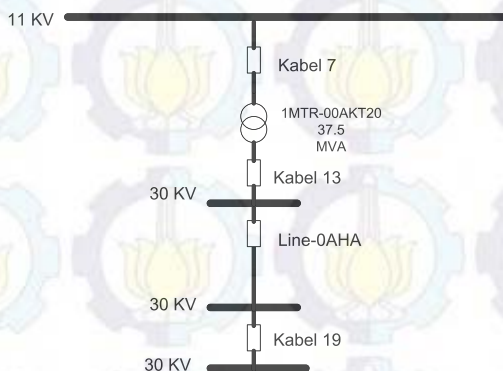
Dari tipikal di atas maka diperoleh :

$$Z_{\text{shortest transmission line}} = Z_{\text{LINE} - \text{AHA}} =$$

$$Z_{\text{shortest transmission line}} = 1.956 \cdot 10^{-3} - j 9.102 \cdot 10^{-3} \text{ pu}$$

4.1.2 Menentukan impedansi paling panjang berdasarkan *single line plant*

Nilai impedansi paling panjang merupakan nilai impedansi dari kabel 19 samapai kabel 7. Untuk menentukan nilai impedansi paling panjang maka dipilih tipikal seperti gambar 4.2.



Gambar 4.2 Tipikal untuk menghitung impedansi paling panjang

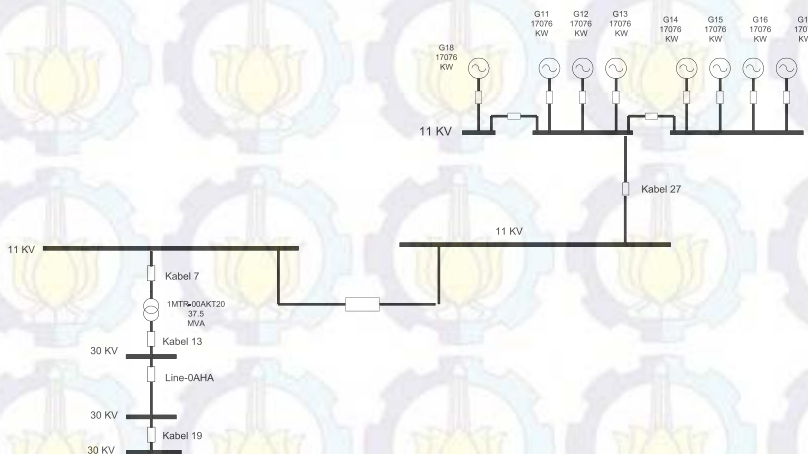
Dari tipikal di atas maka diperoleh :

Z longest transmission line :

$$Z = Z_{\text{LINE} - \text{AHA}} + Z_{\text{MTR} - \text{AKT}} + j$$

$$Z_{\text{longest transmission line}} = 3.44 \cdot 10^{-3} + j 0.0654 \text{ pu}$$

Nilai impedansi maksimum merupakan total impedansi pada sistem atau total impedansi setelah dari pembangkit sampai ke sistem. Untuk menentukan nilai impedansi maksimum maka dipilih tipikal seperti gambar 4.3.



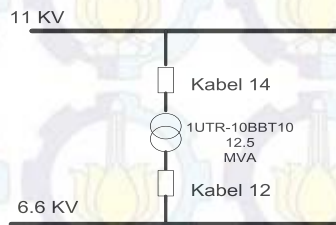
Gambar 4.3 Tipikal untuk menghitung impedansi maksimum

Dari tipikal di atas maka diperoleh :

Figure 1: Schematic diagram of the proposed multi-agent system. The diagram shows a network of agents (represented by gear-like shapes) connected by lines. The agents are labeled with their IDs: 000369, 00714, and 00714. The agents are connected to a central node labeled 'j'. The agents are also connected to a central node labeled 'j'. The agents are connected to a central node labeled 'j'. The agents are connected to a central node labeled 'j'.

4.1.4 Menentukan impedansi minimum berdasarkan *single line plant*

Nilai impedansi minimum merupakan impedansi terpendek di luar sistem atau impedansi terpendek dari generator ke beban-beban pada pembangkitan itu sendiri. Untuk menentukan nilai impedansi minimum maka dipilih tipikal seperti gambar 4.4.



Gambar 4.4 Tipikal untuk menghitung impedansi minimum

Dari tipikal di atas maka diperoleh :

$$Z_{min} = Z_{G-MKA} + j \left(Z_{Kabel\ 14} + Z_{UTR-BBT} + Z_{Kabel\ 12} \right)$$

$$Z_{min} = 0.003894 + j0.115\ pu$$

4.2 Menggambar kurva *capability* generator 1G-10MKA00

Generator memiliki karakteristik yang dikenal sebagai kurva *capability*, dimana perancangan kurva ini berdasarkan batas termal. Langkah – langkah untuk menggambar kurva *capability* generator 1G-10MKA00 adalah :

4.2.1 Menggambar lingkaran *stator winding limiter*

Arus jangkar/*armature* (I_a) yang mengalir pada belitan stator mengakibatkan rugi daya ($I^2 R$). Rugi daya ini dapat mengakibatkan

peningkatan suhu konduktor dan lingkungan terdekat. Jika dibiarkan, peningkatan suhu ini dapat terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, salah satu batasan dalam kurva *capability* generator yaitu besar arus maksimum yang dapat dibawa oleh jangkar tanpa melebihi batas pemanasan yang diizinkan.

$$S \quad P \quad jQ \quad \tilde{E}_t \quad \tilde{I}_t^* \quad 4.1$$

$$S \quad |E_t| \quad |I_t| \quad (\quad \emptyset \quad jsin\emptyset) \quad 4.2$$

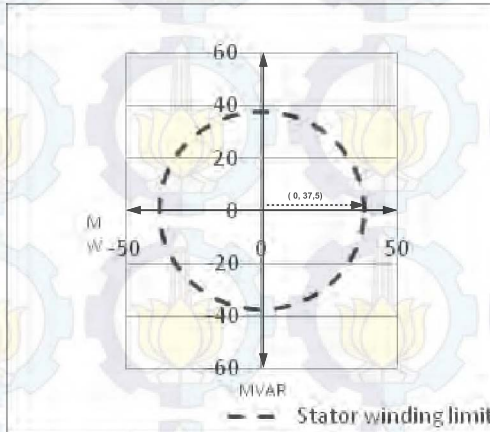
Dimana , S adalah daya semu (VA), P adalah daya aktif (Watt), Q adalah daya reaktif (VAR), E_t adalah tegangan yang dibangkitkan (V), I_t adalah arus (A).

Untuk menggambar lingkaran *stator winding limiter* , maka perlu diketahui nilai jari – jari lingkarannya. Nilai jari - jarinya adalah rating daya semu (S) dari sebuah generator.

$$\text{Jari – jari lingkaran stator winding limiter} = \text{rating daya semu generator} \quad 4.3$$

$$\text{Pusat titik lingkaran : titik } (0,0) \quad 4.4$$

Pada PT. Antam Pomalaa diketahui daya semu generator (S) adalah 37.500 VA atau 37,5 MVA . Maka jari – jari lingkaran stator winding = 37,5. Lingkaran *stator winding limiter* dapat diperhatikan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 *Stator winding limiter*

4.2.2 Menggambar lingkaran rotor winding limiter

Rotor winding limiter disebut juga *field current limiter*/batas arus medan. Akibat adanya pemanasan yang dihasilkan dari rugi-rugi tembaga pada belitan rotor, maka arus rotor juga menentukan batas dalam operasi generator.

Batas arus rotor dipengaruhi oleh arus eksitasi. Dimana arus eksitasi dapat dipertahankan konstan dengan mempertahankan arus searah I_f dibelitan medan konstan. Persamaan untuk mencari nilai jari-jari lingkaran rotor *winding limiter* adalah :

$$\text{Jari - jari stator end limiter} = \frac{E_a V_\phi}{X_s} \quad 4.5$$

$$\text{Pusat titik lingkaran: pada titik} \left(-\frac{V_\phi}{X_s} \right) \quad 4.6$$

Dimana, E_a merupakan tegangan yang dibangkitkan oleh generator (V), V_ϕ merupakan tegangan fasa generator (V), X_s merupakan reaktansi sinkron generator (ohm).

Diketahui :

$$MVA = 37,5 \text{ MVA}$$

$$V_{L-L} \quad KV$$

$$V_{fasa} \quad 6,350853 \text{ KV}$$

$$E_a \quad KV$$

$$X_s \quad ohm$$

$$X_{s-ohm} \quad \text{—} \quad ohm$$

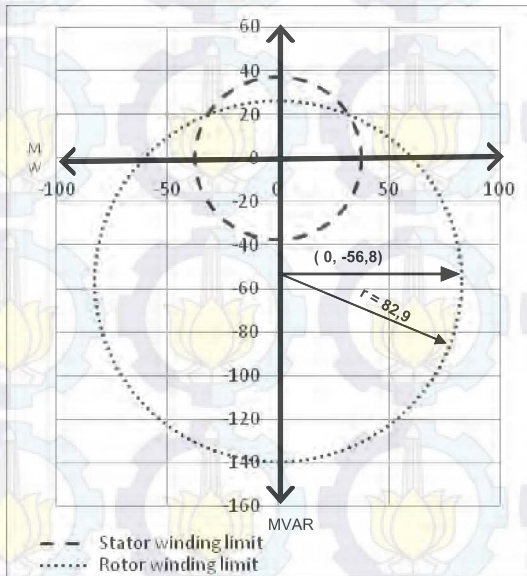
Maka jari – jari *stator end limiter* adalah

$$\text{Jari – jari stator end limiter} = \frac{E_a \quad V_\phi}{X_s}$$

$$\text{Jari – jari stator end limiter} = \text{—}$$

$$\text{Jari – jari stator end limiter}$$

$$\text{Pusat titik lingkaran: pada titik} \left(- \text{—} \right) = (0, -56,8075117)$$



Gambar 4.6 Kurva rotor winding dan stator winding limiter

4.2.3 Menggambar lingkaran stator end limiter

Pemanasan ujung inti stator menentukan batas operasi generator dalam daerah eksitasi lemah (daerah dibawah sumbu P). Pemanasan ujung inti stator disebabkan oleh fluks bocor di celah udara. Fluks bocor tersebut merupakan hasil penjumlahan vektor fluks arus beban di belitan stator dan fluks arus searah pada belitan rotor. Sebagian besar fluks bocor melewati celah udara antara belitan stator dan rotor dan sebagian kecil fluks bocor tetap berada pada bagian akhir dari belitan stator.

Pada saat generator beroperasi dalam kondisi eksitasi lebih maka arus medan tinggi, sehingga di cincin penahan (*retaining ring*) akan mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang kecil. Pada saat beroperasi dalam kondisi eksitasi lemah maka arus medan kecil, sehingga di cincin penahan tidak mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang tinggi. Persamaan untuk mencari nilai jari-jari lingkaran *stator end limiter* adalah :

$$\text{Pusat lingkaran : } \left(K_t \frac{V_\phi}{X_s} \right) \quad 4.7$$

$$\text{Jari – jari lingkaran : } \left(K_t \frac{V_\phi}{X_s} \frac{E_a}{X_s} \right) \quad 4.8$$

$$K_t = \frac{(N_a N_f - N_f)}{(N_a N_f - N_a N_f)} \quad 4.9$$

$$K_t = \sqrt{\frac{\Delta T}{K_t N_a N_f - N_a N_f}} \quad 4.10$$

Dimana, E_a merupakan tegangan yang dibangkitkan oleh generator (V), V_ϕ merupakan tegangan fasa generator (V), X_s merupakan reaktansi sinkron generator (ohm), N_a merupakan jumlah lilitan stator, N_f merupakan jumlah lilitan rotor, ΔT merupakan suhu maksimum yang diijinkan pada bagian ujung inti stator dan rotor, K_t adalah konstanta pemanasan fluks magnetik.

Diketahui :

MVA = 37,5 MVA

V_{L-L} KV

V_{fasa} 6,350853 KV

E_a KV

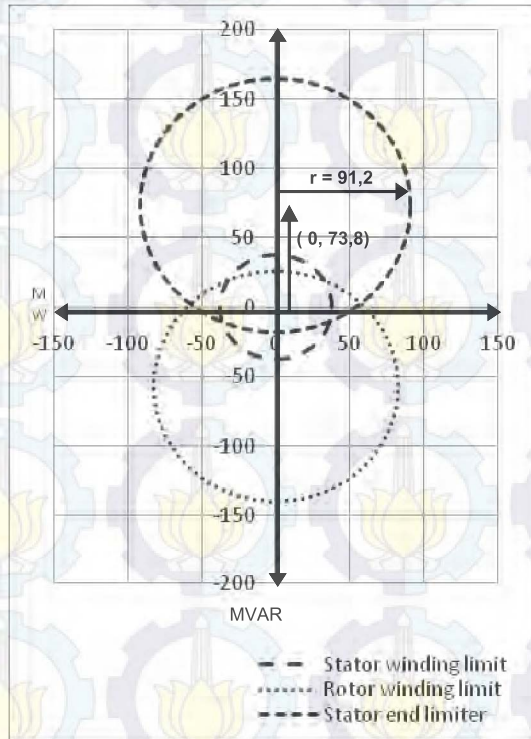
X_s pu

X_{s-ohm} ——— ohm

Karena beberapa parameter untuk menentukan K_t dan K_t tidak diketahui maka untuk nilai K_t dan K_t dimisalkan menjadi $K_t = 1,3$ dan K_t . Plot lingkaran *stator end limiter* dapat dilihat pada gambar 4.7.

$$\text{Pusat lingkaran : } \left(K_t \frac{V_\phi}{X_s} \right) = (0 ; 73,848)$$

$$\text{Jari – jari lingkaran : } \left(K_t \frac{V_\phi}{X_s} \frac{E_a}{X_s} \right) (\quad)$$



Gambar 4.7 Kurva *stator winding limiter*, *rotor winding limiter* dan *stator end limiter*

4.2.4 Menggambar garis *steady state stability limiter (SSSL)*

Saat beroperasi dalam kondisi beban penuh, generator cenderung bekerja pada daerah *leading*, yaitu daerah yang menyerap daya reaktif dari sistem. Dalam kondisi ini, generator harus dioperasikan secara hati-hati, sehingga ditambahkan batas kestabilan *steady state* dalam daerah operasi generator. Kondisi operasi keadaan tunak tercapai jika daya output mekanik (P_m) seimbang dengan daya keluaran listrik (P_e). Apabila beban pada generator meningkat maka putaran rotor akan melambat, dan sebaliknya akan semakin cepat apabila beban menurun. Plot kurva SSSL dapat diperhatikan pada gambar 4.8.

$$\text{Titik pusat} : \frac{V}{\left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s}\right)} \quad 4.10$$

$$\text{Jari-jari} : \frac{V}{\left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s}\right)} \quad 4.11$$

Dimana, X_s merupakan reaktansi sinkron generator (pu), V merupakan tegangan terminal generator (V), X_e merupakan reaktansi hasil penjumlahan dari reaktansi sistem dan reaktansi traformator step up (pu).

Diketahui :

$$X_s \quad pu$$

$$V \quad pu$$

$$X_e \quad pu$$

$$\text{a. } X_{pu \text{ new TR}} = X_{pu \text{ old}} \frac{\frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}}{\frac{KV_{old}}{KV_{base}}}$$

$$X_{pu \text{ new TR}} = \frac{X_{pu \text{ old}} \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}}{\frac{KV_{old}}{KV_{base}}} \quad pu$$

$$\text{b. } X_{pu \text{ new ST1}} = X_{pu \text{ old}} \frac{\frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}}{\frac{KV_{old}}{KV_{base}}}$$

$$X_{pu \text{ new ST1}} = \frac{X_{pu \text{ old}} \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}}{\frac{KV_{old}}{KV_{base}}} \quad pu$$

$X_{pu \text{ old}}$ pu ini diubah ke KV_{base} KV maka :

$$\text{c. } X_{pu \text{ new SG}} = X_{pu \text{ old}} \frac{KV_{old}}{KV_{base}}$$

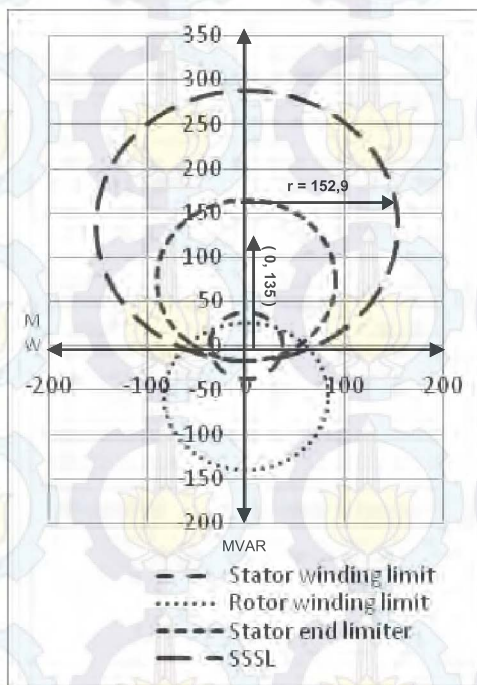
$$X_{pu \text{ new SG}} = \frac{X_{pu \text{ old}} KV_{old}}{KV_{base}} \quad 0.005096 \text{ pu}$$

$$\text{Maka } X_e = X_{pu \text{ new TR}} + X_{pu \text{ new SG}} \quad pu$$

$$X_e \quad pu$$

$$X_e \quad pu$$

- a. Titik pusat $\frac{V}{X_e - X_s}$
 Titik pusat $\frac{V}{X_e - X_s}$
 Titik pusat $\frac{V}{X_e - X_s}$
 Titik pusat $(\quad)pu$ MVA atau MVA
- b. Jari – jari $\frac{V}{X_e - X_s}$
 Jari – jari $\frac{V}{X_e - X_s}$
 Jari – jari pu dari MVA atau MVA



Gambar 4.8 Kurva stator winding limiter, rotor winding limiter, stator end limiter dan SSSL

4.2.5 Menggambar garis *Under Excitation Limiter (UEL)/ Minimum Excitation Limiter (MEL)*

Untuk menggambar garis under eksitasi (MVAR, MWATT) maka digunakan persamaan berikut ini :

$$\text{Titik MVAR} = \text{VAR pu} \times \text{MVA generator (MVAR)} \quad 4.12$$

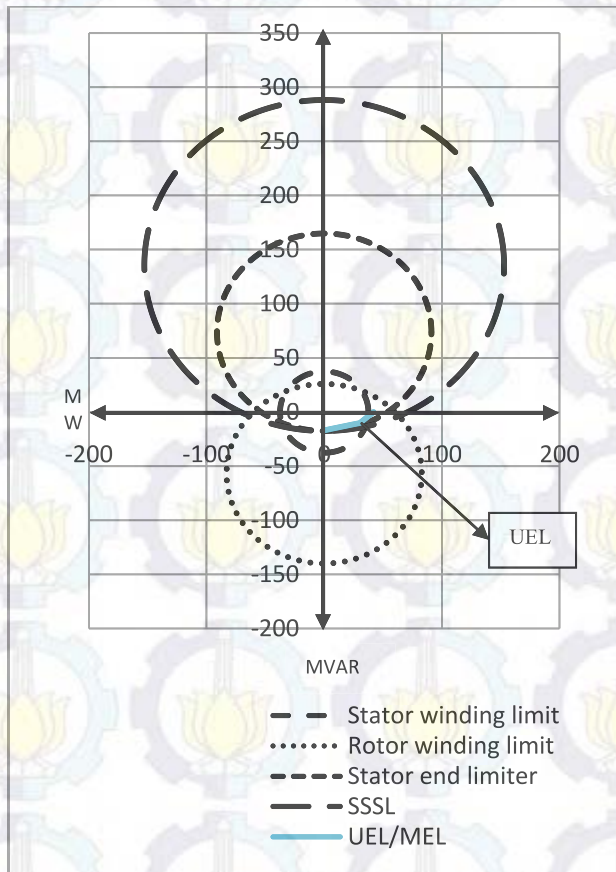
$$\text{Titik MW} = \text{WATT pu} \times \text{MVA base generator (MW)} \quad 4.13$$

Dimana, VAR (pu) dimisalkan -0,45;-0,27; 0 pu dan WATT (pu) dimisalkan 0; 0,81; 1,12 pu.

Sehingga berdasarkan persamaan 4.12 dan 4.13 diperoleh nilai MW dan MVAR pada tabel 4.1. Titik untuk menggambar garis UEL/MEL pada kurva MW-MVAR adalah (0,-16.875), (30.375,-10.125),(42,0). Garis tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9.

Tabel 4.1 Nilai MW dan MVAR

Watts pu	Var pu	MW	MVAR
0	-0.45	0	-16.875
0.81	-0.27	30.375	-10.125
1.12	0	42	0



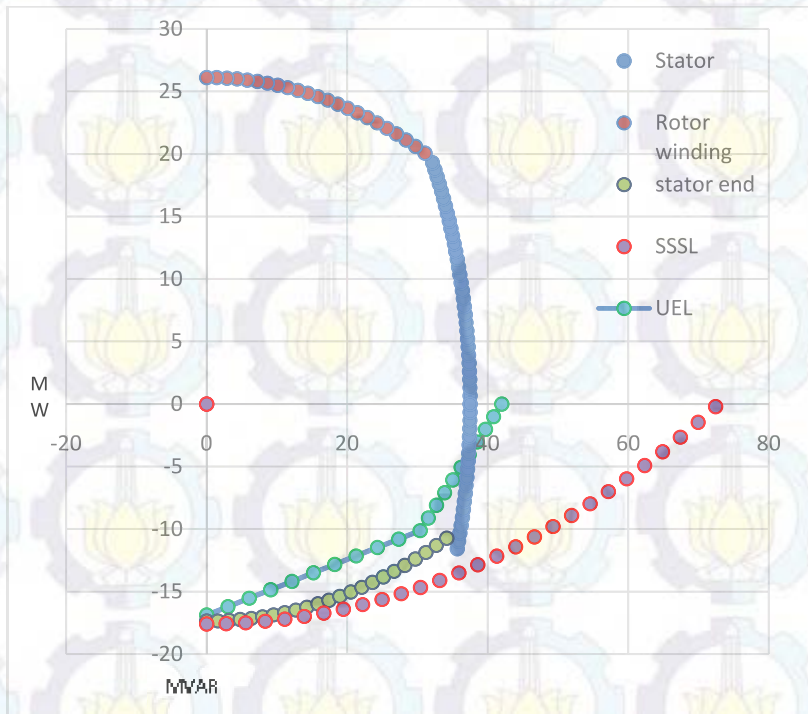
Gambar 4.9 Kurva stator winding limiter, rotor winding limiter, stator end limiter, SSSL dan UEL

4.3 Kurva *capability* generator 1G-10MKA00

Dari langkah – langkah menggambar kurva *capability* di atas, maka kurva *capability* generator 1G-10MKA00 terbentuk dari garis lingkaran *stator end limiter*, *rotor winding limiter* dan SSSL yang berpotongan pada satu titik dengan lingkaran *stator winding limiter*. Plot kurva *capability* generator dapat dilihat pada gambar 4.10.

1. Titik lingkaran *stator winding limiter* (32.14377 ; 19.31393) berpotongan dengan titik lingkaran *rotor winding limiter* (31.06691 ; 29.0858)
2. Titik lingkaran *stator winding limiter* (32.14377 ; 19.31393) berpotongan dengan titik lingkaran *stator end limiter* (-1.7 ; -17.3756)
3. Titik lingkaran *stator winding limiter* (32.14377 ; 19.31393) berpotongan dengan titik lingkaran SSSL (-2.9 ; -17.6056)

Selain dari perpotongan lingkaran – lingkaran di atas, pada kurva *capability* generator ini juga terdapat plot garis UEL/MEL. Garis ini terbentuk dari tiga titik pemisalan untuk nilai VAR dan WATT.



Gambar 4.10 Kurva *capability* generator 1G-10MKA00

4.4 Menggambar kurva R-X

Karakteristik rele LOF menggunakan 2 *mho relay*. Karakteristik rele ini diperlihatkan pada kurva R-X. Karakteristik pertama disebut dengan *zone 1* dan karakteristik kedua disebut juga dengan *zone 2*. LOF dapat memiliki 2 metode untuk mendeteksi gangguan, dimana metode pertama disebut dengan *scheme 1* dan metode kedua disebut *scheme 2*. Koordinasi rele LOF dengan MEL (*minimum excitation limiter*) merupakan konversi kurva P-Q ke kurva R-X. Koordinasi keduanya diharapkan dapat beroperasi dengan baik ketika terjadi gangguan kehilangan eksitasi pada generator 1G-10MKA00 di PT. Antam Pomalaa.

4.4.1 Menggambar metode *scheme 1* pada kurva R-X

Scheme 1 digunakan jika terjadi gangguan yang menyebabkan MEL mengalami *undershoot* sehingga mengakibatkan VAR mengalir ke karakteristik rele LOF. Jika terjadi *undershoot*, waktu trip rele LOF tipe CEH51A diatur mulai dari 1 sampai 3 detik untuk mencegah *misoperation*. Langkah – langkah menggambar *zone 1* dan *zone 2* adalah :

4.4.1.1 *Zone 1*

Untuk menggambar *zone 1*, diameter, offset dan pusat di *zone 1* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

- a. Diameter = dimisalkan 1 pu 4.14
- b. Offset $-\frac{X_d'}{}$ 4.15
- c. Pusat $\frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{}$ 4.16

dimana, X_d' adalah reaktansi transien generator (ohm).

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X_d' = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

Zone 1

1. X_{pu} pu, maka X_{ohm} rele = diameter adalah :

$$X_{\Omega} = \frac{KV}{MVA} \cdot \frac{X_{pu}}{R_c} \cdot \frac{R_v}{R_v}$$

$$X_{\Omega} = \frac{KV}{MVA} \cdot \frac{X_{pu}}{R_c} \cdot \frac{R_v}{R_v}$$

$$X_{\Omega} \text{ diameter } 80 \text{ } 6667 \text{ } \Omega$$

2. Offset dari lingkaran $\frac{x'd}{pu}$ — *pu* atau :

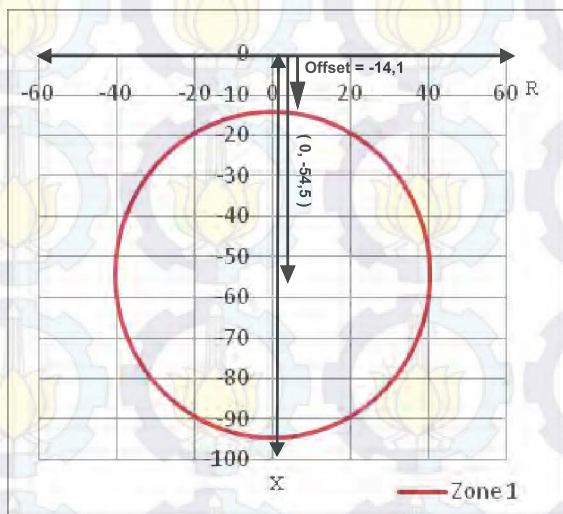
$$X_{\Omega-} = \frac{\frac{KV}{MVA} X_{pu}}{\frac{R_c}{R_v}}$$

$$X_{\Omega-sec} \quad \text{offset} \quad -14 \ 1167 \ \Omega$$

3. Pusat $\frac{Offset - Diameter}{2}$

$$Pusat = \frac{-}{-}$$

$$Pusat \quad -54 \ 45 \ \Omega$$



Gambar 4.11 Kurva karakteristisk *mho relay* pada zone 1

4.4.1.2 Zone 2

Untuk menggambar *zone 2*, diameter, *offset* dan pusat di *zone 2* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

$$d. \text{ Diameter} = X_d' \quad 4.17$$

$$e. \text{ Offset} = \frac{X_d'}{2} \quad 4.18$$

$$f. \text{ Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 4.19$$

Dimana, X_d' adalah reaktansi transien generator (ohm), X_d adalah reaktansi sinkron generator (ohm).

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X_d' = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

Zone 2

1. Diameter lingkaran *mho relay* adalah X_d pu atau :

$$X_{\Omega} = \frac{KV}{MVA} \cdot \frac{X_{pu}}{R_v} \quad \Omega$$

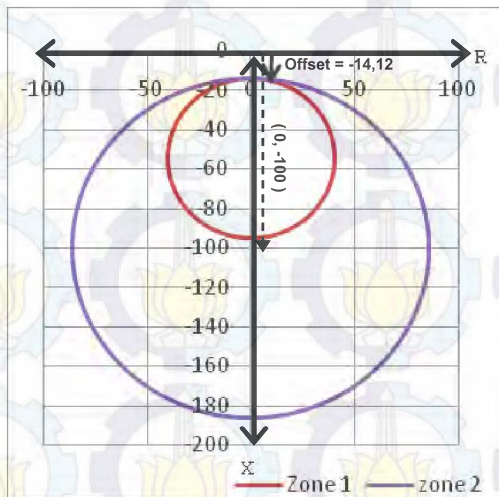
X_{Ω} diameter

2. Offset dari lingkaran mho ini di set sama dengan zone 1 yaitu - 14,1167 Ω

3. Pusat $\frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$

Pusat — —

Pusat —100 027 Ω

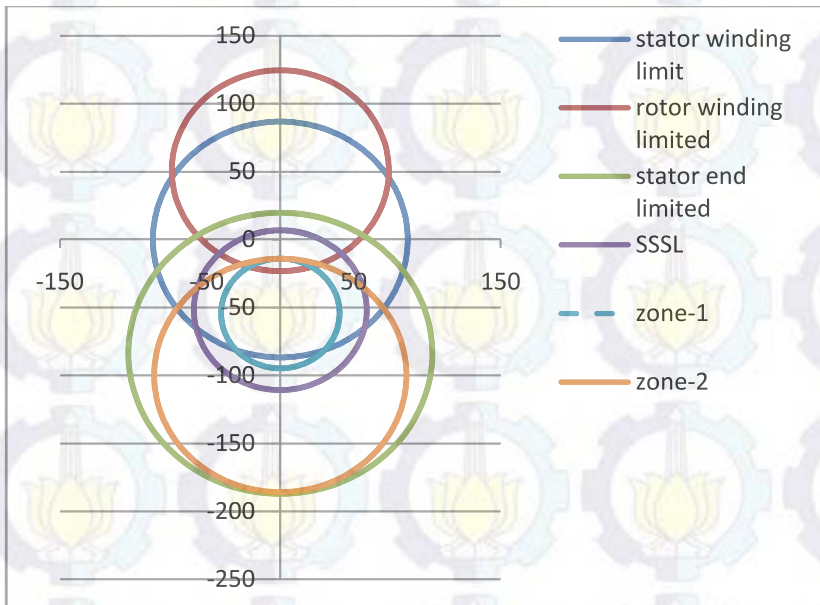


Gambar 4.12 Kurva karakteristik *mho relay* pada *zone 1* dan *zone 2* *scheme 1*

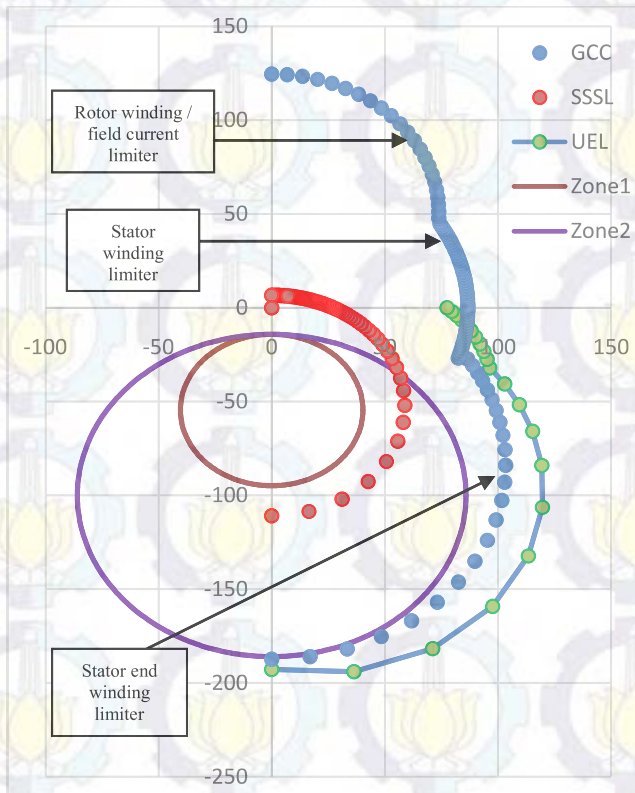
4.4.2 Kurva koordinasi *Scheme 1* dengan *capability generator*

Koordinasi *mho relay* pada *scheme 1* ditunjukkan pada gambar 4.14. Koordinasi ini merupakan konversi dari kurva P-Q ke R-X. Kurva ini menunjukkan bahwa jika terjadi gangguan LOF pada generator 1G-10MKA00 maka rele LOF dan MEL melakukan koordinasi secara tepat.

Kurva *capability* generator dalam bentuk P-Q jika di konversi ke kurva R-X akan diperlihatkan oleh gambar 4.13. Perpotongan dari garis lingkaran *stator winding limiter*, *rotor winding limiter*, dan *stator end limiter* merupakan gambar kurva *capability* generator pada kurva R-X. Jika gambar 4.13 disederhanakan maka akan menjadi gambar 4.14.



Gambar 4.13 Koordinasi kurva karakteristik *mho relay* pada *scheme 1* dan *capability* generator



Gambar 4.14 Koordinasi kurva karakteristik *mho relay* pada *scheme 1* dan *capability* generator yang telah disederhanakan

Jika terjadi gangguan internal dari generator (bagian eksitasi) dan mencapai batas *steady state stability limit* (SSSL) maka LOF akan bekerja. Jika swing atau ayunan pada rotor terjadi ketika pelepasan beban maka akan mengakibatkan lepas sinkron, sehingga diharapkan MEL yang bekerja. Semua parameter – parameter yang terdapat pada kurva *capability* (P-Q) dikonversi ke kurva R-X dengan menggunakan persamaan :

$$Z_{relay} = \frac{KV}{MVA} \frac{R_c}{R_v} \quad 4.20$$

$$\frac{KV}{Z_{relay}} = \text{---} \quad 4.21$$

dimana :

Z_{relay} = impedansi rele (ohm)

KV = Tegangan system

MVA = Kapasitas generator (MVA)

R_c = Rasio arus

R_v = Rasio tegangan

Pada *scheme 1* zona 1 disetting dengan waktu tunda yang lebih cepat dari pada *zone 2*, karena *zone 1* bekerja untuk mendeteksi gangguan yang besar pada kondisi *under* eksitasi. Waktu tunda yang digunakan sekitar 1-3 detik sebelum *misoperation*.

4.4.3 Menggambar metode *scheme 2* pada kurva R-X

Pada metode *scheme 2* ini tidak hanya mengamankan gangguan LOF yang berasal dari internal generator tetapi dapat mengamankan gangguan yang menuju sistem dan trafo yang berada setelah wilayah yang diproteksi. Parameter yang digunakan untuk penghitungan setting *zone 1* dan *zone 2* pada *scheme 2* yaitu reaktansi sinkron dan reaktansi *transient* generator. Langkah – langkah menggambar *zone 1* dan *zone 2* adalah :

4.4.3.1 *Zone 1*

Untuk menggambar *zone 1*, diameter, *offset* dan pusat di *zone 1* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

$$g. \text{ Diameter} = \frac{X_d - X_d'}{ } \quad 4.22$$

$$h. \text{ Offset} = \frac{X_d'}{ } \quad 4.23$$

$$i. \text{ Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{ } \quad 4.24$$

dimana X_d' adalah reaktansi transien generator (ohm), X_d adalah reaktansi sinkron generator (ohm)

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X_d' = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

1. Diameter lingkaran dalam pu :

$$Z_{\text{diameter}} = X_d - \frac{X_d'}{R_v}$$

$$Z_{\text{diameter}} = \frac{X_d - \frac{X_d'}{R_v}}{R_v} \text{ pu atau :}$$

$$X_{\Omega} = \frac{KV}{MVA} \frac{X_{pu}}{R_v} \frac{R_c}{R_v}$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_d - \frac{X_d'}{R_v}}{R_v} \frac{R_c}{R_v}$$

$$X_{\Omega} \text{ diameter } \Omega$$

2. Offset zone 1 di set :

$$Z_{\text{offset}} = \frac{X_d'}{R_v}$$

$$Z_{\text{offset}} = \frac{X_d'}{R_v}$$

$$Z_{\text{offset}} = \frac{X_d'}{R_v} \text{ pu atau :}$$

$$X_{\Omega} = \frac{KV}{MVA} \frac{X_{pu}}{R_v} \frac{R_c}{R_v}$$

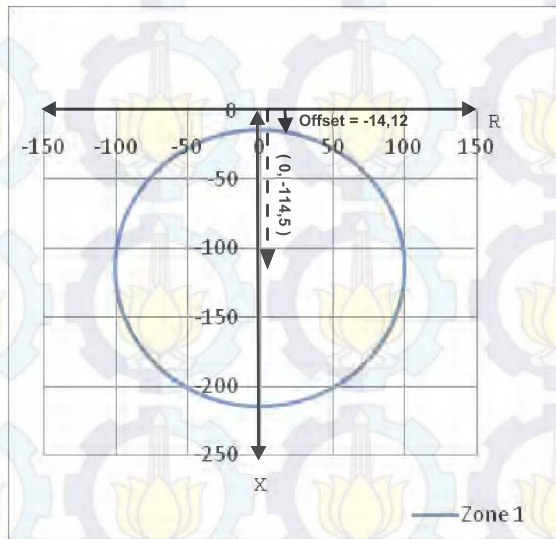
$$X_{\Omega} = \frac{\quad}{\quad} \frac{\quad}{\quad} \frac{\quad}{\quad}$$

$$X_{\Omega} = \quad - \quad \Omega$$

3. Pusat $\frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{\quad}$

Pusat $\frac{\quad}{\quad}$

Pusat $-114\ 446\ \Omega$



Gambar 4.15 Kurva karateristik *mho relay* pada *zone 1 scheme 2*

4.4.3.2 Zone 2

Untuk menggambar *zone 2*, diameter, *offset* dan pusat di *zone 2* harus diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menemukan nilai dari parameter tersebut adalah :

$$j. \text{ Diameter} \quad X_{TG} \quad X_d \quad X_{min SG} \quad 4.23$$

$$k. \text{ Offset} \quad X_{TG} \quad X_{min SG} \quad 4.24$$

$$l. \text{ Pusat} \quad \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2} \quad 4.25$$

dimana X_{TG} adalah reaktansi trafo pada generator *base* (ohm), X_d adalah reaktansi sinkron generator (ohm), $X_{min SG}$ adalah reaktansi minimum trafo pada generator *base* (ohm).

Diketahui :

MVA Generator = 37,5 MVA

Tegangan dasar = 11 KV

X'_d = 0,35 pu

X_d = 2,13 pu

Rasio CT = 2500/1

Rasio PT = 11000/110

Agar proteksi pada saat operasi under eksitasi dapat bekerja dengan baik maka diset 125% dari reaktansi sistem.

1. Diameter lingkaran dalam pu :

$$Z_{\text{diameter}} \quad X_d \quad X_{pu \text{ new TR}} \quad X_{pu \text{ new SG}}$$

$$Z_{\text{diameter}}$$

$$Z_{\text{diameter}} \quad \text{pu atau :}$$

$$Z_{\Omega} \quad \frac{KV}{MVA} \quad \frac{X_{pu}}{R_v} \quad \frac{R_c}{R_v}$$

$$Z_{\Omega} \quad \text{diameter} \quad \Omega$$

2. Offset zone 2 adalah :

$$Z_{offset} = \frac{X_{pu} \text{ new TR} - X_{pu} \text{ new SG}}{R_c / R_v}$$

$$Z_{offset} = \frac{X_{pu} \text{ new TR} - X_{pu} \text{ new SG}}{R_c / R_v} \text{ pu atau :}$$

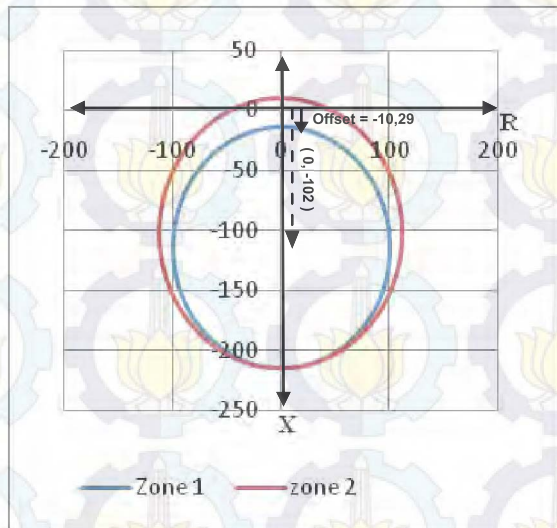
$$X_{\Omega} = \frac{KV}{MVA} \cdot \frac{X_{pu}}{R_v}$$

$$X_{\Omega} = \frac{KV}{MVA} \cdot \frac{X_{pu}}{R_v}$$

3. Pusat $\frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$

$$\text{Pusat} = \frac{\text{Offset} - \text{Diameter}}{2}$$

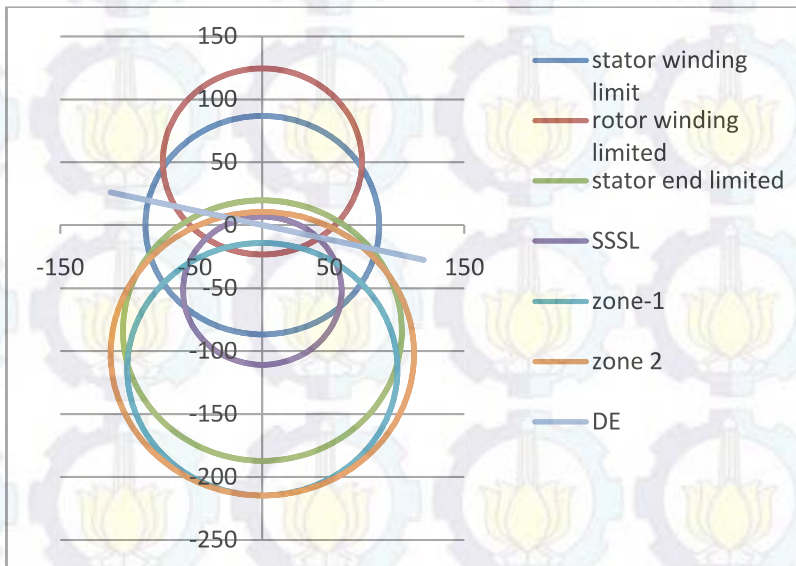
$$\text{Pusat} = -102.14 \Omega$$



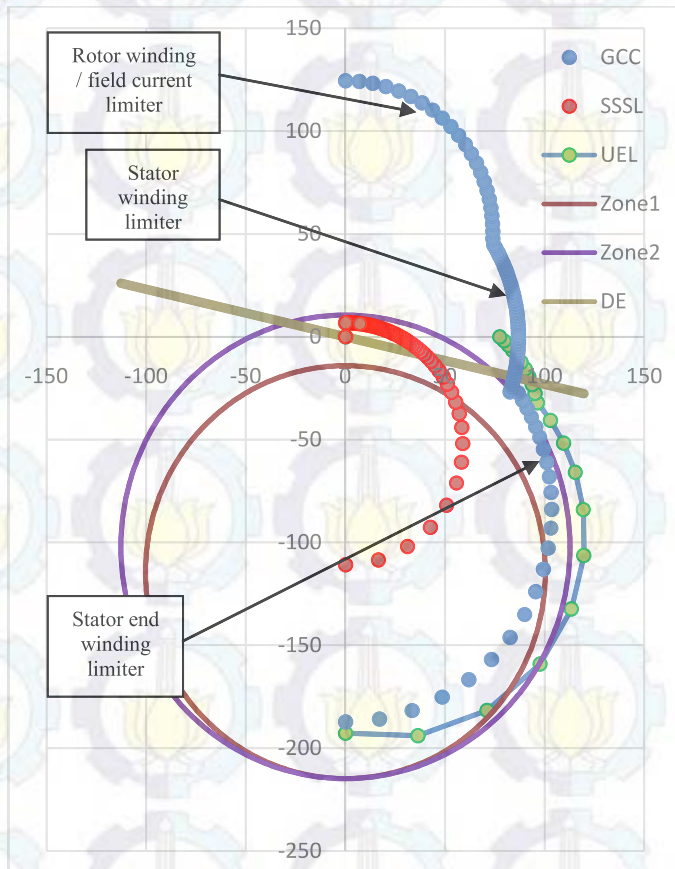
Gambar 4.16 Kurva karakteristik mho relay pada zone 1 dan zone 2 scheme 2

4.4.4 Kurva koordinasi *scheme 2* dengan *capability* generator

Kurva koordinasi *scheme 2* dengan *capability* generator ditunjukkan pada gambar 4.18. Pada *scheme 2* ini, ketika *zone 2* berada pada *offset* positif, *directional elemen* (DE) berfungsi mencegah gangguan yang menuju ke trafo dan sistem. DE secara umum diset antara sudut $^{\circ}$ dan $^{\circ}$. Pada *scheme 2* ini diset dengan sudut sebesar $^{\circ}$. Waktu tripping pada *zone 2* disetting sebesar 0,25 detik. Kurva koordinasi *scheme 2* dengan *capability* generator terbentuk dari perpotongan garis lingkaran *stator winding limiter*, *rotor winding limiter*, dan *stator end limiter* pada satu titik. Koordinasinya dapat dilihat pada gambar 4.17, kemudian disederhanakan menjadi gambar 4.18.



Gambar 4.17 Koordinasi kurva karakteristik *mho relay* pada *scheme 2* dan *capability* generator



Gambar 4.18 Koordinasi kurva karakteristik *mho relay* pada *scheme 2* dan *capability* generator yang telah disederhanakan

Kurva pada gambar 4.18 menunjukkan bahwa koordinasi LOF dan MEL pada metode *scheme 2* ini tidak bekerja dengan baik. Jika terjadi swing yang tidak menyebabkan lepas sinkron maka MEL tidak bekerja. Hal ini dapat dilihat dengan kurva *capability* generator dan MEL berada di dalam *zone 1*. Sehingga jika terjadi swing yang tidak menyebabkan lepas sinkron maka generator 1G-10MKA00 akan *off*.

4.5 Koordinasi rele LOF dengan rele jarak (*back up*)

Prinsip dasar rele jarak adalah berdasarkan rasio perbandingan tegangan dan arus gangguan yang terukur pada lokasi rele yang terpasang untuk menentukan apakah gangguan yang terjadi berada di dalam atau luar *zone* yang diproteksinya. Rele jarak pada proteksi LOF ini digunakan sebagai *back up* atau sebagai rele cadangan saat terjadi gangguan.

Relay jarak dengan karakteristik mho menggunakan satu atau dua *zone*. Masing – masing *zone* menggunakan persyaratan yang berbeda – beda. Syarat setting *zone 1* diasumsikan dengan adanya kesalahan – kesalahan seperti penyetelan *zone 1* sebelumnya (CT error atau PT error) maka sebagai *back up* perlu disetting berdasarkan 2 kondisi yaitu penyetelan minimum dan maksimum :

1. Penyetelan minimum = 120% dari impedansi yang diamankan (impedansi yang digunakan impedansi trafo).
2. Penyetelan maksimum = set 80% dari *Zona 1* yang merupakan saluran transmisi terpendek kemudian ditambah dengan reaktansi trafo step up.

Sedangkan *zone 2* pada umumnya disetting lebih kecil dari 3 persyaratan berikut ini :

1. Penyetelan minimum = 120% dari reaktansi saluran transmisi terpanjang
2. 50 sampai 67% reaktansi dari generator ke beban. Batas generator mengalami *full load* jika diset 150 sampai 200% impedansi dari generator ke beban.
3. Penyetelan maksimum = 80 sampai 90% reaktansi dari generator ke beban pada sudut torsi maksimum *zone 2*

4.5.1 Setting *zone 1*

Setting *zone 1* terdiri dari 2 kriteria yaitu :

4.5.1.1 *Criteria 1*

120 % dari $X_{pu\ new TR}$ pu , diubah dalam bentuk ohm :

$$X_{\Omega \text{ new TR}} = \frac{\frac{KV}{MVA} X_{pu}}{\frac{R_c}{R_v}} \quad \Omega$$

4.5.1.2 Criteria 2

Set 80 % dari setting saluran paling pendek kemudian ditambah dengan impedansi trafo step up. Impedansi saluran paling pendek pada sistem adalah - pu :

$$X_{pu \text{ new SLG}} = X_{pu \text{ old}} \left(\frac{MVA_{old}}{MVA_{base}} \right) \left(\frac{KV_S}{KV_{Thigh}} \right) \left(\frac{KV_{TLOW}}{KV_G} \right) - pu$$

Dikonversi ke dalam bentuk ohm :

$$X_{ohm \text{ new SLG}} = \frac{\frac{KV}{MVA} X_{pu}}{\frac{R_c}{R_v}} \quad \Omega$$

Zone 1 merupakan 80% dari saluran maka :

$$Z_r = X_{\Omega \text{ new TR}} + X_{ohm \text{ new SLG}} \quad \Omega$$

Zone 1 paling kecil disetting 10,083 Ω pada MTA 85°

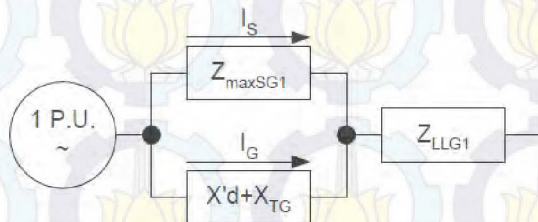
Dimana $X_{\Omega new TR}$ adalah reaktansi trafo (ohm), Z_r adalah eaktansi trafo pada *criteria* 1(ohm), $X_{pu new SLG}$ adalah eaktansi saluran terpanjang pada generator base (ohm).

4.5.2 Setting zone 2

a. Setting Zone 2

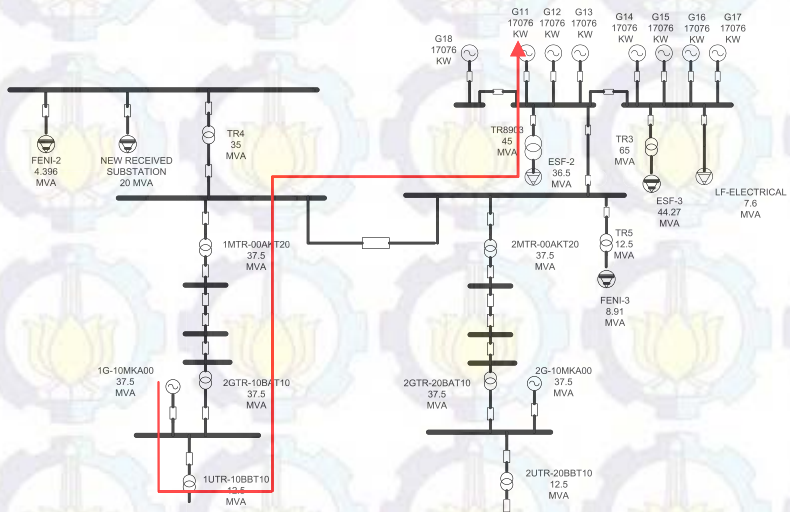
Infeed adalah pengaruh penambahan atau pengurangan arus yang melalui titik terminal terhadap arus yang melalui rele yang ditinjau. Secara umum infeed dapat disebabkan adanya pembangkit antara rele dengan titik gangguan atau dapat juga disebabkan adanya perubahan konfigurasi saluran dari saluran transmisi ganda ke tunggal atau sebaliknya. Adanya pengaruh infeed ini akan membuat impedansi yang dilihat rele menjadi lebih besar (*overreaching*) atau menjadi lebih kecil (*underreaching*).

1. *Criteria* 1



Gambar 4.19 Saluran transmisi dari ganda ke tunggal

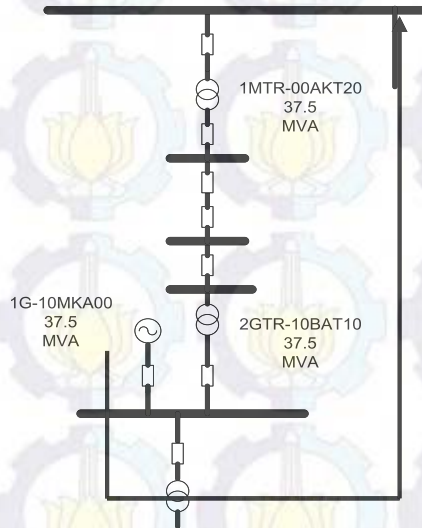
- a. Mencari nilai Z_{SG}
 Z_{SG} merupakan impedansi mulai dari generator sampai ke sistem.



Gambar 4.20 Tipikal untuk menentukan Z_{SG}

$$\begin{array}{ccccccc}
 Z_{total} & Z_{G-MKA} & Z & Z & Z_{GTR-BAT} & Z & Z_{LINE-AHA} \\
 & Z_{kabel} & Z_{MTR-AKT} & & Z_{kabel} & Z_{kabel} & A \\
 Z_{total} & - & - & - & - & - & - \\
 & - & - & - & - & - & - \\
 & - & - & j & - & - & - \\
 & j & - & - & - & - & - \\
 Z_{total} & - & - & pu & - & - & -
 \end{array}$$

- b. Mencari nilai Z_{LLG}
 Z_{LLG} merupakan impedansi mulai dari generator sampai ke saluran transmisi terpanjang.



Gambar 4.21 Tipikal untuk menentukan Z_{LLG}

$$Z_{LLG} = \frac{Z_{G-MKA}}{Z_{LINE-AHA}} \cdot \frac{Z_{cable}}{Z_{cable}} \cdot \frac{Z_{GTR-BAT}}{Z_{MTR-AKT}} \cdot \frac{Z_{cable}}{Z_{cable}}$$

$$Z_{LLG} = \dots pu$$

Diketahui :

$$\frac{Z_{total}}{X'_d} = \dots pu$$

$$X_{TG} \quad pu$$

$$Z_{LLG} \quad - \quad pu$$

$$Z_{Total} = \frac{Z_{SG} \cdot X'_{d'} + X_{TG} \cdot Z_{LLG}}{X'_{d'} + X_{TG}}$$

$$Z_{Total} = -j0,166 \text{ pu}$$

$$Z_{Total} = -j$$

$$I_{total} = \frac{1}{Z_{Total}}$$

$$I_{total} = \frac{1}{-j}$$

$$I_{total} = 0,106 - j2,63 \text{ pu}$$

c. Arus yang mengalir di Z_{SG} :

$$I_s = I_{total} \cdot \frac{X'_{d'} + X_{TG}}{X'_{d'} + X_{TG} + Z_{SG}}$$

$$I_s = 0,81 - j2,26 \text{ pu}$$

d. Arus yang mengalir di I_G :

$$I_G = I_{total} \cdot \frac{Z_{SG}}{X'_{d'} + X_{TG} + Z_{SG}}$$

$$I_G = 0,91 - j0,36 \text{ pu}$$

$$I_G = \text{pu}$$

Dari kriteria 1, untuk setting zone 2 adalah :

$$Z_{LINE} X_{TG} \left(\frac{I_s I_G}{I_G} \right) Z_{LLG} X_{pu} \text{ rele kedua zone 1}$$

$$Z_{LINE} \left(\frac{I_s I_G}{I_G} \right) -$$

$$Z_{LINE} \angle \text{ } ^\circ \text{ ohm , maksimum sudut pada zone 2 (MTA) } =$$

2. Criteria 2

Diketahui :

Tegangan dasar	= 11 KV
$X'd$	= 0,35 pu
X_d	= 2,13 pu
Rasio CT	= 2500/1
Rasio PT	= 11000/110
pf	= 0,85
MTA	= $^\circ$
RPFA	= $^\circ$

$$Z_{load} \frac{KV_G}{MVA_G} \frac{CT_{ratio}}{VT_{ratio}}$$

$$Z_{load} \frac{KV_G}{MVA_G} \frac{CT_{ratio}}{VT_{ratio}}$$

$$Z_{load} \angle \text{ } ^\circ \text{ ohm (pf)}$$

$$Z_{MTA} \frac{Z_{load}}{MTA - RPFA}$$

$$Z_{MTA} \frac{Z_{load}}{MTA - RPFA} \angle \text{ } ^\circ$$

$$Z_{MTA} \angle \text{ } ^\circ \text{ ohm}$$

3. Criteria 3

80 sampai 90% impedansi dari generator ke beban pada sudut torsi maksimum zone 2 $^{\circ}$.

$$Z_{GCC-MTA} = \frac{\frac{KV_G}{MVA_G} \cdot \frac{CT_{ratio}}{VT_{ratio}}}{Z_{GCC-MTA}} \angle \quad ^{\circ} \text{ ohm} (pf) \quad)$$

$$Z_{MTA} \quad Z_{GCC-MTA} \quad \angle \quad ^{\circ} \text{ ohm}$$

ohm

Z_{SG} impedansi mulai dari generator sampai ke sistem (pu), Z_{LLG} adalah impedansi mulai dari generator sampai ke saluran transmisi terpanjang (pu), I_{total} adalah arus gangguan di saluran transmisi yang paling panjang (pu), I_s adalah arus yang mengalir di Z_{SG} (pu), I_G adalah arus kontribusi yang mengalir ke generator (pu), Z_{load} adalah impedansi *base* / dasar generator (ohm), MTA adalah sudut maksimum torsi pada zone 2, Z_{MTA} adalah reaktansi pada zone 2 padan saat kondisi 150% *full load* ketika sudut torsi maksimum $^{\circ}$ (ohm), $Z_{GCC-MTA}$ adalah impedansi *base* / dasar generator (ohm), Z_{MTA} adalah reaktansi pada zone 2 pada saat kondisi 90% *full load* ketika sudut torsi maksimum $^{\circ}$ (ohm)



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mozina Charles J, Reichard Michael, “*Coordination of generator protection with generator excitation control and generator capability*”,IEEE PES Copyright Material.2007
- [2] Windarhariadi Stafanus, “ Dasar Pengontrolan Sistem Eksitasi Generator Sinkron”<URL:[https://stefanuswindarhariadi. Wordpress. com /2012/07/01/generator-sinkron/](https://stefanuswindarhariadi.Wordpress.com/2012/07/01/generator-sinkron/)>, Juli, 2012.
- [3] Subeno Edi, “ Analisa Setting Mho Rele Sebagai Proteksi Hilang Penguat Generator” <URL : [http://eprints.undip.ac.id /25442/1/ML2F097629.pdf](http://eprints.undip.ac.id/25442/1/ML2F097629.pdf) >, Makalah Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro UNDIP.Semarang.2002.
- [4] Elmore Walter A, “*Protective relaying teory and application*”, second edition revised and expanded.New York.10016
- [5] Reimert Donald, “*Protective relaying for power generation system*”,Taylor and Francis Group,LLC.2006.
- [6] Blackburn J.Lewis, Domin Thomas J., “*Protective relaying principles and applications*”, third edition.Taylor and Francis Group,LLC.2006.
- [7] Handoyo Wuri Eko,”Sistem Proteksi Generator Turbin Gas Pada Unit Operasi Kaltim 2 Menggunakan G60 Universal Rele PT.Pupuk Kaltim Timur”,Makalah Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro UNDIP,Semarang,Oktober,2010.
- [8] Udiklat Semarang PT.PLN (Persero), “Koordinasi Proteksi Pembangkit Dengan Grid, Makalah Edisi 1,Semarang, April, 2007.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Ada dua metode yang digunakan pada proteksi *loss of field* yaitu *scheme 1* dan *scheme 2*. *Scheme 2* merupakan pengembangan dari *scheme 1*, dengan penambahan *directional elemen* (DE) dan modifikasi kurva *capability* generator maka rele lebih sensitif bekerja ketika terjadi gangguan. Dengan demikian, *scheme 2* merupakan metode yang lebih efektif dibandingkan dengan *scheme 1*, karena selain mencegah VAR leading yang menuju ke generator *scheme 2* juga dapat mencegah gangguan yang menuju ke sistem dan trafo.
2. Berdasarkan analisis kurva koordinasi *capability* generator dengan MEL pada metode *scheme 1* dan 2, metode proteksi *loss of field* yang tepat digunakan di PT. Antam Pomalaa adalah *scheme 1*. Penerapan metode *scheme 2* di PT. Antam Pomalaa tidak efektif karena MEL dan kurva *capability* generator berada di dalam zone 1 dan zone 2 sehingga mengakibatkan rele akan trip dan generator off.

5.2 Saran

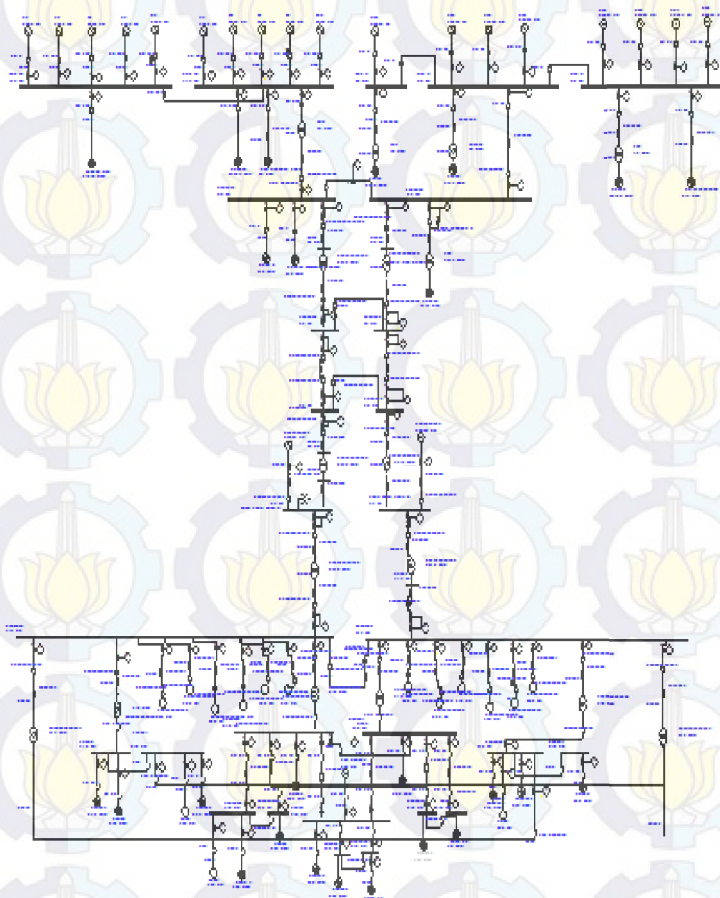
1. Setting zone 2 pada *scheme 2* sebaiknya diperkecil, dengan cara memperkecil nilai impedansi terpanjang di luar sistem. Sehingga metode *scheme 2* dapat diterapkan di PT. Antam Pomalaa.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

Lampiran -1

One-Line Diagram - OLV1 (Edit Mode)



Lampiran -2

Mengubah besaran ke dalam pu dengan MVA base = 100
MVA

1. Kabel 28

Name plate :

Panjang (L) = 57 m = 0,057 km

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,01 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,01 + j 0,23}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,00826 + j 0,1901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,00826 + j 0,1901}{1000} \times 0,057$$

$$Z_{pu} = 4,7082 \times 10^{-7} + j 1,08357 \times 10^{-5} \text{ pu}$$

2. Kabel 21

Name plate :

Panjang (L) = 40 m = 0,04 km

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,01 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,01 + j 0,23}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,00826 + j 0,1901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,00826 + j 0,1901}{1000} \times 0,04$$

$$Z_{pu} = 3,304 \times 10^{-7} + j 7,604 \times 10^{-6} \text{ pu}$$

3. Kabel 19 = Kabel 3

Name plate :

Panjang (L) = 43 m

Tegangan Base (V_{base}) = 33 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03 + j0,47 \left(1000 \frac{\Omega}{\text{m}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(33)^2}{100} = 10,89$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_n}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,03 + j 0,47}{10,89}$$

$$Z_{pu} = 2,7548 \times 10^{-3} + j 0,0432 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{2,7548 \times 10^{-3} + j 0,0432}{1000} \times 43$$

$$Z_{pu} = 1,18457 \times 10^{-4} + j 1,8576 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

4. Kabel 7

Name plate :

Panjang (L) = 40 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_n = 0,01 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_n}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,01 + j 0,23}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,00826 + j 0,1901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,00826 + j 0,1901}{1000} \times 40$$

$$Z_{pu} = 3,304 \times 10^{-4} + j 7,604 \times 10^{-3} pu$$

5. Kabel 27

Name plate :

Panjang (L) = 400 m = 0,4 km

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03999 + j0,103 \left(1000 \frac{\Omega}{km} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,03999 + j 0,103}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,03304 + j 0,08512 pu$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03304 + j 0,08512}{1000} \times 0,4$$

$$Z_{pu} = 1,3216 \times 10^{-5} + j 3,4048 \times 10^{-5} pu$$

6. Kabel 35

Name plate :

Panjang (L) = 65 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03999 + j0,0998 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03999 + j 0,0998}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,03304 + j 0,08248 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03304 + j 0,08248}{1000} \times 65$$

$$Z_{pu} = 2,1476 \times 10^{-3} + j 5,36116 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

7. Kabel 33 = Kabel 37

Name plate :

Panjang (L) = 50 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,03999 + j0,0998 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,03999 + j 0,0998}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,03304 + j 0,08248 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,03304 + j 0,08248}{1000} \times 50$$

$$Z_{pu} = 1,652 \times 10^{-3} + j 4,124 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

8. Kabel 39

Name plate :

Panjang (L) = 750 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,0768 + j0,109 \left(1000 \frac{\Omega}{\text{m}} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,0768 + j0,109}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,06347 + j 0,0901 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,06347 + j 0,0901}{1000} \times 750$$

$$Z_{pu} = 0,0476 + j 0,0676 \text{ pu}$$

9. Kabel 14

Name plate :

Panjang (L) = 26 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,04 + j0,68 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

- $Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{0,04 + j0,68}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,0331 + j 0,5619 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,0331 + j 0,5619}{1000} \times 26$$

$$Z_{pu} = 8,606 \times 10^{-4} + j 0,0146 \text{ pu}$$

10. Kabel 12

Name plate :

Panjang (L) = 55 m

Tegangan Base (V_{base}) = 11 KV

$$Z_{\Omega} = 0,02 + j0,34 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(11)^2}{100} = 1,21$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,02 + j0,34}{1,21}$$

$$Z_{pu} = 0,0165 + j 0,28099 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,0165 + j 0,28099}{1000} \times 55$$

$$Z_{pu} = 9,075 \times 10^{-4} + j 0,01545 \text{ pu}$$

11. Kabel 32

Name plate :

Panjang (L) = 125 m

Tegangan Base (V_{base}) = 6,6 KV

$$Z_{\Omega} = 1,15 + j0,23 \left(1000 \frac{\Omega}{m} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(6,6)^2}{100} = 0,4356$$

- $Z_{pu} = \frac{Z_n}{Z_{base}}$

$$Z_{pu} = \frac{1,15 + j0,23}{0,4356}$$

$$Z_{pu} = 2,64 + j 0,528 \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{2,64 + j 0,528}{1000} \times 125$$

$$Z_{pu} = 0,33 + j 0,066 \text{ pu}$$

Trafo

a) 2GTR-10BAT10 = 1MTR-00AKT10

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,00278 + j0,12497 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 37,5 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,00278 + j 0,12497) \times \frac{37,5}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 1,0425 \times 10^{-3} + j 0,04686 \text{ pu}$$

b) TR8903

Name plate :

$$Z_{p.u\ old} = 0,00278 + j0,12497 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 45 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u\ new} = Z_{p.u\ old} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u\ new} = (0,00278 + j 0,12497) \times \frac{45}{100}$$

$$Z_{p.u\ new} = 1,251 \times 10^{-3} + j 0,05623 \text{ pu}$$

c) TR1

Name plate :

$$Z_{p.u\ old} = 0,00333 + j0,14996 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 60 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u\ new} = Z_{p.u\ old} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u\ new} = (0,00333 + j0,14996) \times \frac{60}{100}$$

$$Z_{p.u\ new} = 1,998 \times 10^{-3} + j 0,08997 \text{ pu}$$

d) TR3

Name plate :

$$Z_{p.u\ old} = 0,00333 + j0,14996 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 65 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u\ new} = Z_{p.u\ old} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,00333 + j0,14996) \times \frac{65}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 2,1645 \times 10^{-3} + j 0,0974 \text{ pu}$$

e) 1UTR-10BBT10

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,00614 + j0,07976 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 12,5 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,00614 + j0,07976) \times \frac{12,5}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 7,675 \times 10^{-4} + j 9,97 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

Generator

A. 1G-10MKA00

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,2 + j0,00362 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 37,5 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,2 + j0,00362) \times \frac{37,5}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 1,3575 \times 10^{-3} + j 0,075 \text{ pu}$$

$$B. \quad G_{18} = G_{11} = G_{12} = G_{13} = G_{14} = G_{15} = G_{16} = G_{17}$$

Name plate :

$$Z_{p.u \text{ old}} = 0,221 + j0,00884 \text{ p.u}$$

$$MVA_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$MVA_{old} = 21,345 \text{ MVA}$$

$$\checkmark \quad Z_{p.u \text{ new}} = Z_{p.u \text{ old}} \times \frac{MVA_{old}}{MVA_{base}}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = (0,221 + j0,00884) \times \frac{21,345}{100}$$

$$Z_{p.u \text{ new}} = 1,887 \times 10^{-3} + j 0,0472 \text{ pu}$$

Transmisi – 0AHA

Name plate :

Panjang (L) = 3,1 km = 1,92 mile

Tegangan Base (V_{base}) = 33 KV

$$Z_{\Omega} = 0,010392 + j0,040968 \left(1 \frac{\Omega}{\text{mile}} \right)$$

$$\bullet \quad Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(33)^2}{100} = 10,89$$

$$\bullet \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{0,010392 + j0,040968}{10,89}$$

$$Z_{pu} = 9,543 \times 10^{-4} + j 3,762 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

$$Z_{pu} = \frac{9,543 \times 10^{-4} + j 3,762 \times 10^{-3}}{1} \times 1,92$$

$$Z_{pu} = 1,83 \times 10^{-3} + j 7,22 \times 10^{-3} \text{ pu}$$